国际电气工程先进技术译丛

WILEY
www.wiley.com

智能电网可再生能源系统设计

Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems

（美）Ali Keyhani 著

刘长浥 陈默子 许晓艳 贺敬 张利 译

刘长浥 校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

关于本书

智能电网可再生能源微电网系统是电力工程领域近年来兴起的一个革命性概念。本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，最后论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。本书每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍MATLAB仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。

本书撰写的初始目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，但由于它内容非常丰富，也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

国际电气工程先进技术译丛

智能电网可再生能源系统设计

（美）Ali Keyhani 著

刘长浥 陈默子 许晓艳 贺敬 张利 译

刘长浥 校

机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，并论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍 MATLAB 仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。

翻译本书的目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，同时也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

译　者　序

随着全球变暖和能源枯竭问题日益引起人们的关注，有效利用可再生能源从而替代化石燃料并减少温室气体排放已经成为一个极其重要的全球性问题。与此相关，电力产业在发电、输电、配电和用电等各个环节都在发生革命性的变化。智能电网可再生能源微电网系统是电力工程领域近年来兴起的一个革命性概念。它的突出特点是可以为最终用户提供发电、自维持和配送电的手段，从而使他们能控制自己的能源需求；从电网角度看，它可以提高供电连续性和可靠性，加大削峰填谷力度，降低备用需求，提高电网运营的经济性。

本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，最后论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。本书每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍 MATLAB 仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。各章的具体内容在前言中有详细说明，此处不再赘述。

本书撰写的初始目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，但由于它内容非常丰富，也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

本书作者阿里·凯伊哈尼博士（Ali Keyhani，PhD）现任美国俄亥俄州立大学电力及计算机工程系教授，是 IEEE 会员，曾多次获得俄亥俄州立大学工程学院研究奖。他曾为很多电力企业和其他行业做过研究和咨询工作，并在 IEEE 工程学报上发表过很多论文。他发表的专著除本书外，还有《智能电网 2011（Smart Power Grids 2011）》、《电力系统中绿色可再生能源并网（Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems）》等。

可能因为成书仓促，原书存在不少错误。最多的是图、表、例题、习题编号标示或对应性有误，数字引用错误，符号错误等；此外，还有一些表示法不规范或与我国规定不同。这些问题和一些其他错误在翻译时都尽可能改正了，并以“译者注”简要标出。另外，本书大量使用英制计量单位，可能会使我国读者感到不习惯，我们也尽量做了注解。

本书译校者都是中国电力科学研究院新能源研究所的科研人员。具体分工为：

刘长浥译第1、2、7、8章和辅文及附录，陈默子译第4章，许晓艳译第5章，贺敬译第3章，张利译第6章；刘长浥通校全书并统稿。由于时间紧迫以及我们的外语和专业水平的限制，译文很可能有这样或那样的错误，还请读者不吝指教。

本书的翻译和编辑工作得到了机械工业出版社电工电子分社编辑付承桂和她的同事们的大力支持和帮助，使翻译工作得以顺利进行，本书得以尽早与读者见面，谨在此深表谢意。

原　书　序

我很荣幸能在阿里·凯伊哈尼（Ali Keyhani）教授撰写的这本非常重要的《智能电网可再生能源系统设计》前面说上几句话。

电力产业重组对个人股东来说是一个能使他们广泛参与电力的生产、配送和使用的关键步骤。“智能电网”进一步提供了替代手段以提高电力系统的可靠性、可持续性和供用户选择的能力。智能电网可以创建在临界运行条件下作为独立孤岛运行的微电网。这种小型装置可以在大电网面临重大事故时提高区域电力系统的可靠性。有几个微电网装置的实例表明，在分布式电网中使用智能开关可以减少停电次数，缩短停电持续时间。

此外，智能电网可以使微电网优化使用不稳定、间歇性的可再生能源，并提高区域电力系统的可持续性。使用主要跟踪发电的日负荷特性的太阳能光伏发电以及当地风力发电，并辅以微电网装置的储能设备，可以为微电网负荷提供比较廉价和可持续的供电手段。储能广泛利用的原理也见于新兴的即插即用的电动汽车市场，它可以利用低谷时期的风电。这样利用微电网可以避免穿越世界上的人口稠密区新建高压输电线来传输可再生能源发出的电力。

然而，我相信，电力工业的进化必然会使向个体用户的电力配送方式产生革命性变化。这种进化主要体现在与实时电价、以小时计的需求响应以及扩大了用户为提高能源效率而做出的选择等相关的智能电网应用。智能电网的创新使用户可以根据每天的日程、需求和喜好，并为考虑变化电价节省开支来安排他们的用电优先顺序。智能电网的发展也可以使自动化控制系统能对家庭和企业用电进行优化，确定装置运行的最佳时间以降低用电成本。

用户参与可以提供大量激励手段来优化电力运营，如免除高成本机组在峰荷期间投运，推迟只在每年的峰荷期间（只有数百小时）才需要做出响应的指令系统升级，降低输电系统事故机会等，从而降低运行成本；否则电力系统就会运行于接近崩溃临界点的状态。需求响应也可以减少日负荷曲线的波动，从而可以对日负荷曲线做出预测，更加综合、高效地规划发电的燃料及水力消耗。

我相信，本书会向读者展示一些可以在不久的将来潜在地改变发电、送电和用

电模式的主题。我乐于祝贺凯伊哈尼教授对电力系统创新的密切关注，并感谢他致力于把这类主题介绍给我们大家。

美国伊利诺伊州芝加哥　伊利诺伊理工学院　电力创新中心

特聘教授，主任

穆罕默德·谢罕德普（Mohammad Shahidehpour）

2011 年 1 月

原 书 前 言

可持续的电力生产和高效利用可用能源从而降低或消除碳足迹是我们在21世纪面临的最重大挑战之一。对于我们这些从事电力工程的人来说，这是一项特别艰巨的任务。本书把可持续电力生产问题作为微电网和智能电网可再生能源系统设计的一部分加以论述。

如今，互联网为工程专业的学生提供了浩瀚的资源；我们教师的任务是为利用这些资源提供定义明确的学习方法。我们还应该用能激发他们想象力的习题向他们提出挑战。本书处理这个问题的方式是提供系统方法，全面应用这里介绍的可持续生产绿色电力的概念，并提供可帮助进行可再生能源微电网实际设计的分析工具。我会在每一章介绍一个关键工程的习题，然后给出这一习题的数学模型和MATLAB试验平台，说明解题步骤。有些例子给出了解题过程，但还有很多习题放在每章的末尾，它们的设计意图是对学生的思维提出挑战。相关参考文献也列在每章末尾。

本书还提供解题指导手册和带动画的PPT讲义。可以采用它们并把它们转换为符合教师需要的演示形式。每章末尾所附的习题的答案也包含在解题指导手册中㊀。

本书介绍的概念综合了电力工程的三个领域：电力系统、电力电子学和电能转换系统。本书还介绍了作为大功率电网系统一部分的风电及光伏微电网的初步设计。本书对读者的要求是对电路知识有初步了解。本书介绍了相量系统、三相系统、变压器、DC/DC变换器和AC/DC整流器，并以此作为它的基础。所有这些内容都融入作为大功率互联网一部分的可再生能源微电网的设计。

第1章除了对能源使用做了历史回顾外，还通过一系列碳足迹计算分析了化石燃料的使用与整个国家的化石燃料消耗及单个家用电器对应的化石燃料消耗的关系。第2章回顾了电力系统、单相负荷、三相负荷、单相及三相变压器、配电系统、输电线路及电力系统建模的基本原理，还介绍了电力系统分析使用的通用化标幺值系统。第3章内容包括AC/DC整流器、DC/AC逆变器和脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）方法。它重点介绍利用逆变器作为电力系统的三端口元件使风电和光伏发电并入电网，还介绍了PWM逆变器的MATLAB仿真。第4章介绍了智能电网的设计及运行的基本概念。该章从系统角度介绍了智能电网的元件和它们的功能，并概括说明了智能电网运行的复杂性。该章的覆盖范围包括感应、测

㊀ 译者注：本书的中文版没有包括这里说的解题指导手册和PPT讲义。

量、集成通信及智能计量；实时电价；智能电网的网络控制；绿色能源高度渗透到大规模互联电网；间歇性电源和电力市场。该章还介绍了同步发电机运行的初步建模和操作，输电线路的潮流限制、潮流问题、负荷系数计算及它们对智能电网运行的影响、实时电价及微电网。这些概念搭建了可再生能源并入电力系统的舞台。第5章研究了光伏能源。该章介绍如何进行光伏组件发电量的计算，以及组件对太阳所处位置的相对倾斜角要多大才能发出最大电量。该章还介绍了光伏组件的建模、光伏电站的微电网设计和光伏系统的最大功率点跟踪。第6章介绍了风力发电，以描述感应发电机建模作为可再生能源系统微电网的一部分。该章还介绍了双馈感应发电机、变速永磁发电机、无电刷发电机的使用，从系统角度看待的变速风电转换。第7章介绍了电网母线导纳和阻抗的建模，以及作为大型互联电力系统一部分的微电网的潮流分析。第8章介绍了潮流的牛顿方程，潮流问题的牛顿-拉夫逊解法以及潮流研究中的快速解耦算法。

本书给出了使用绿色能源的电网和微电网集成的基本概念，这实际上是所有国家的目标。微电网设计是使用绿色能源、电力电子、控制传感技术、计算机技术和通信系统的基础设施现代化的关键。

Ali Keyhani
2011年1月
于美国佛罗里达州Sanibel岛

致　　谢

过去 10 年中，我的研究工作一直得到美国国家科学基金会（National Science Foundation，NSF）的支持，本书是 NSF 赠款支持的工作之一[1]。多年来，我的一些学生和研究生都对本书介绍的内容做出过贡献。特别要提到的是埃及 Zagazig 大学工程系电力及机械工程部的博士生 Abir Chatterjee 和 Adel El Shahat Lotfy Ahmed。

感谢我的妻子 Maureen Keyhani 的理解和支持。

我还要感谢 John Wiley & Sons 出版社发展部主任 Simone Taylor、协调部的 Michael Christian 和 STM 出版服务公司的 Kate McKay 的帮助。

[1] 原书注：本书的某些资料基于 NSF 奖 ECCS0501349、ECCS0105320 和 ECCS0118080 支持的工作。这些材料表达的意见、成果、结论或建议都是作者本人的，并不一定反映 NSF 的观点。

目　　录

译者序
原书序
原书前言
致谢

第 1 章　能源与文明 …… 1

1.1　引言 …… 1
1.2　化石燃料 …… 1
1.3　能源枯竭 …… 2
1.4　一种替代能源：核能 …… 4
1.5　全球变暖 …… 5
1.6　电力系统时代 …… 8
1.7　绿色可再生能源 …… 9
1.7.1　氢 …… 9
1.7.2　太阳能和光伏发电 …… 10
1.7.3　地热能 …… 11
1.7.4　生物质能 …… 11
1.7.5　乙醇 …… 11
1.8　能量单位及转换 …… 11
1.9　电量成本估计 …… 15
1.10　小结 …… 16
习题 …… 17
参考文献 …… 18

第 2 章　电网 …… 20

2.1　引言 …… 20
2.2　电网 …… 20
2.2.1　背景 …… 20
2.2.2　电网系统的结构 …… 21
2.3　电网的基本概念 …… 24
2.3.1　常用术语 …… 24

2.3.2　消耗功率计算 …… 25
2.4　负荷模型 …… 37
2.5　电网中的变压器 …… 40
2.5.1　变压器简史 …… 40
2.5.2　输电电压 …… 40
2.5.3　变压器 …… 41
2.6　微电网系统建模 …… 44
2.6.1　标幺值系统 …… 45
2.7　三相变压器建模 …… 53
2.8　抽头接换变压器 …… 55
2.9　输电线建模 …… 56
习题 …… 66
参考文献 …… 70

第3章　微电网系统中的变换器建模 …… 71

3.1　引言 …… 71
3.2　单相两开关逆变器 …… 71
3.3　单相四开关双极全桥逆变器 …… 81
3.3.1　单极性单相全桥逆变器的 PWM …… 83
3.4　三相 DC/AC 逆变电路 …… 86
3.5　PWM 控制方法 …… 86
3.5.1　三角波法 …… 86
3.5.2　恒等式法 …… 91
3.6　三相逆变器分析 …… 91
3.7　可再生能源微电网 …… 100
3.8　绿色能源系统中的直流变换器 …… 102
3.8.1　升压变换器 …… 102
3.8.2　降压变换器 …… 110
3.8.3　升降压变换器 …… 116
3.9　整流器 …… 120
3.10　脉宽调制整流电路 …… 123
3.11　使用正弦 PWM 开关技术的三相电压源整流器 …… 126
3.12　微电网运行中的逆变器定容 …… 129
3.13　微电网运行中的整流器定容 …… 130
3.14　微电网运行中的直流变换器定容 …… 131
习题 …… 131

参考文献…………………………………………………………………… 135

第 4 章 智能电网系统…………………………………………………… 136

4.1 引言 ……………………………………………………………… 136
4.2 电网运行 ………………………………………………………… 136
4.3 纵向组合及市场化结构的电力公司 …………………………… 142
4.4 电网运行控制 …………………………………………………… 144
4.5 负荷-频率控制 …………………………………………………… 145
4.6 自动发电控制 …………………………………………………… 149
4.7 运行备用计算 …………………………………………………… 154
4.8 智能电网的基本概念 …………………………………………… 154
4.9 负荷系数 ………………………………………………………… 160
4.9.1 负荷系数与实时定价 ………………………………………… 162
4.10 计算机控制的智能电网………………………………………… 165
4.11 智能电网的发展………………………………………………… 167
4.12 智能微电网可再生绿色能源系统……………………………… 168
4.13 电网汽轮发电机………………………………………………… 174
4.14 电网建模………………………………………………………… 181
习题…………………………………………………………………… 187
参考文献……………………………………………………………… 192
补充文献……………………………………………………………… 193

第 5 章 太阳能微电网系统……………………………………………… 195

5.1 引言 ……………………………………………………………… 195
5.2 太阳能转换过程：热能电厂 …………………………………… 198
5.3 光伏发电转换 …………………………………………………… 200
5.4 光伏电池材料 …………………………………………………… 201
5.5 光伏特性 ………………………………………………………… 202
5.6 光伏效率 ………………………………………………………… 204
5.7 光伏系统设计 …………………………………………………… 208
5.8 光伏组件建模 …………………………………………………… 218
5.9 光伏性能测试 …………………………………………………… 220
5.10 光伏方阵的最大功率点………………………………………… 220
5.11 蓄电池储能系统………………………………………………… 231
5.12 基于单单格蓄电池的储能系统………………………………… 233
5.13 光伏组件在不同入射角度下的发电量………………………… 251

5.14 光伏发电技术现状……251
5.15 光伏组件模型参数估算……252
习题……253
参考文献……260
补充文献……261

第6章 风能微电网系统……263

6.1 引言……263
6.2 风力发电……264
6.3 风力发电机……268
6.4 感应电机建模……271
6.4.1 计算转差率……276
6.4.2 感应电机等效电路……277
6.5 感应电机潮流分析……280
6.6 感应发电机运行……282
6.7 动态特性……293
6.8 双馈感应发电机……299
6.9 无刷双馈感应发电机系统……301
6.10 变速永磁发电机……301
6.11 变速同步发电机……303
6.12 带与电网隔离变换器的变速发电机……303
习题……305
参考文献……306

第7章 电网和微电网的潮流分析……308

7.1 引言……308
7.2 电网分析中的电压计算……308
7.3 潮流问题……311
7.4 作为电力系统工程工具的潮流研究……312
7.5 母线类型……312
7.6 潮流问题的一般性表述……316
7.7 母线导纳模型……318
7.8 母线阻抗矩阵模型……319
7.9 潮流问题表述……320
7.10 母线导纳的高斯-赛德尔法……322
7.11 母线阻抗的高斯-赛德尔法……326

7.12 潮流的母线导纳和母线阻抗解法的比较 …… 330
7.13 微电网的同步及非同步运行 …… 331
7.14 高级潮流解法：牛顿-拉夫逊法 …… 333
7.14.1 牛顿-拉夫逊法 …… 335
7.14.2 牛顿-拉夫逊法的一般性表述 …… 339
7.14.3 解耦牛顿-拉夫逊法 …… 341
7.15 潮流快速解耦法 …… 342
7.16 潮流问题分析 …… 343
习题 …… 354
参考文献 …… 362
补充文献 …… 363

第8章 电网和微电网故障研究 …… 365

8.1 引言 …… 365
8.2 电网故障电流计算 …… 365
8.3 对称分量法 …… 368
8.4 发电机的相序网络 …… 372
8.5 光伏发电站建模 …… 374
8.6 平衡三相输电线的相序网络 …… 375
8.7 平衡三相变压器的地电流 …… 377
8.8 零序网络 …… 378
8.8.1 变压器 …… 378
8.8.2 负荷联结 …… 380
8.8.3 电网 …… 381
8.9 故障研究 …… 383
8.9.1 平衡三相故障分析 …… 385
8.9.2 不平衡故障 …… 399
8.9.3 单线对地故障 …… 399
8.9.4 双线对地故障 …… 401
8.9.5 线间故障 …… 403
习题 …… 414
参考文献 …… 418

附录 …… 419

附录A 复数 …… 419
附录B 输电线和配电线的典型数据 …… 421

参考文献 …… 424
附录 C　光伏组件的发电量与入射角的关系 …… 424
参考文献 …… 434
附录 D　风力发电 …… 434
参考文献 …… 437

第 1 章　能源与文明

1.1　引言

能源技术在社会经济发展和社会发展中起核心作用。基于化石燃料的技术提高了我们的生活质量，但同时，获得这些进步的代价也相当高昂。化石能源是环境污染及退化的首要原因，它们不可逆转地破坏了我们环境的各个方面。全球变暖是我们消费化石燃料的结果。例如，湖泊和河流中的鱼类受到快速工业化的一种副产品汞的污染。化石燃料的处理和使用提高了公众的健康成本：卫生保健费用过去和现在都一直花在与环境污染有关的健康问题上，如煤矿工人的黑肺病。对控制这些宝贵资源的孜孜不倦的探索和需求加大了政治冲突。我们现在依赖的能源是不可持续的，因为能源需求一直在增长，而这些有限的资源正在被耗尽。随着石油供应的减少，寻找可持续而且对环境和人类都安全的能源就越来越迫切了。

1.2　化石燃料

据估计，化石燃料（石油、天然气和煤炭）是在 3 亿 ~ 3 亿 7 千万年前生成的[1]。经过数百万年，生活在世界海洋中的动植物群遗骸的分解物生成了第一批石油。随着海洋消退，这些遗骸被砂土层覆盖，经历的严酷气候变化（冰河时代、火山爆发以及干旱）把它们更深地埋入地壳并更接近地核。由于受到强热和压力，这些遗骸基本被蒸发成为石油。如果查看字典中的词汇“石油（petroleum）”，可以看到它的含义是“石头的油”或“来自土中的油”。

古代闪族人、亚述人、波斯人和巴比伦人在卡鲁恩河（Karun）和幼发拉底河（Euphrates）沿岸发现了渗出地表的石油。历史上，人们把石油用于多种目的：古波斯人和古埃及人把液态油用作医治伤口的药品；伊朗的琐罗亚斯德教徒（Zoroastrian）在从地表渗出的油上面建造它们的火坛（fire temple）[1]；美洲土著人用油来密封它们的独木舟[1]。

事实上，尽管有记录的人类使用能源的历史相当有限，但我们可以从古代的手工制品和历史遗迹想象到能源对人类早期文明的影响。在埃及的金字塔、希腊的帕特农神殿、伊朗的波斯波利斯遗址（Persepolis）、中国的万里长城和印度的泰姬陵都可以看到最早期社会的遗产以及它们使用木材、木炭、风力和水力的遗迹。

1.3　能源枯竭

图 1-1 画出了各种能源生成所需的大约时间。生成煤炭、石油和天然气花费的时间需要数百万年。如今使用的石油是 100 万年以前形成的[1]。如果观察过去几个世纪使用的能源，就可以发现我们一直在用新能源替代旧能源。最早使用的能源是木材，然后煤炭取代了木材，而石油开始取代人们使用的某些木材，使得目前石油提供了能源需求的最大部分。图 1-2 所示为世界石油生产（消费）1965～2000 年的实际情况和 2005～2009 年的估计情况。

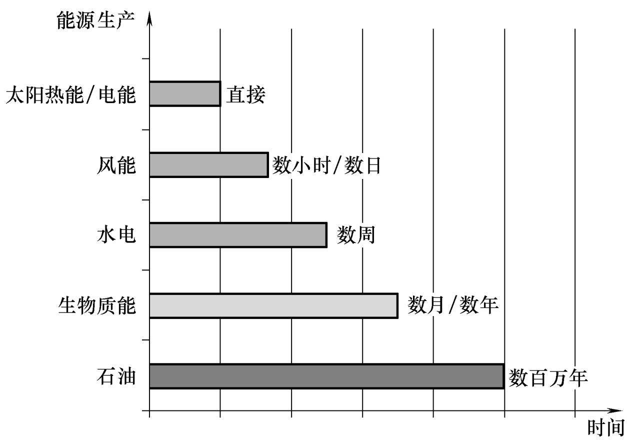


图 1-1　各种能源生成所需的大约时间

自工业革命以来，人们一直在使用煤炭。从 1800 年以来的大约 200 年里，人们使用石油。然而人们最早使用的能源是用来煮食物的木材和木炭。历史记录表明，人类生活在地球上的大约 100000 年中，使用木材能源约有 5000 年。与此相似，有历史记录的 5000 年中，人们使用石油的历史大约为 200 年。在不久的将来，石油储量就会被耗尽。石油是不可再生的；我们必须储备能源，节约石油以及天然气。

中东地区提供美国进口石油的 50% 以上。美国自己的石油生产在 1970 年前后达到顶峰（见图 1-3）。除北海油田外，欧洲生产的石油很有限，它完全依赖从世界其他地方进口石油。亚洲的印度、日本和韩国都依赖进口石油。印度和巴西的经济快速发展也加速了世界石油储量的枯竭。

仔细观察表 1-1 可以发现，如果世界储量以如今的消费速度使用的话，石油将在 40 年后耗尽，天然气储量将在不到 60 年后耗尽，而煤炭将在 200 年后耗尽。没有人能预见未来，但可以让每个能源使用者处于一种基于可再生能源的新能源经济中，通过节约能源、减少碳足迹（carbon footprint）及安装分布式可再生能源来成为能源生产者。

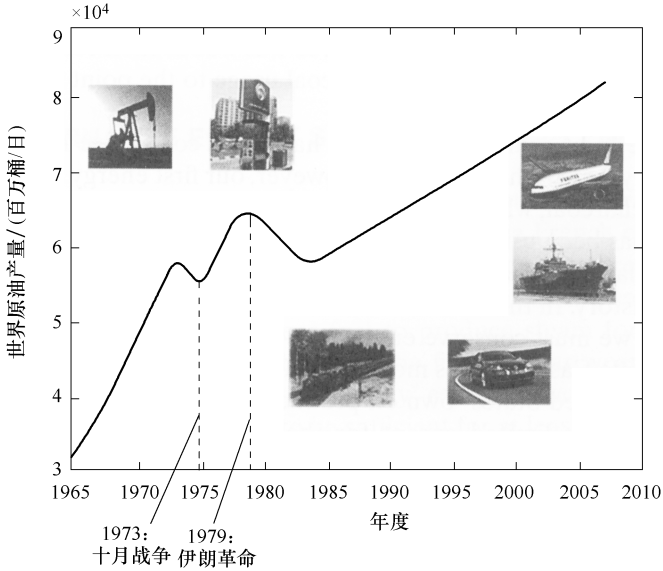


图 1-2　世界石油生产（消费）1965～2000 年的实际情况和 2005～2009 年的估计情况[3]

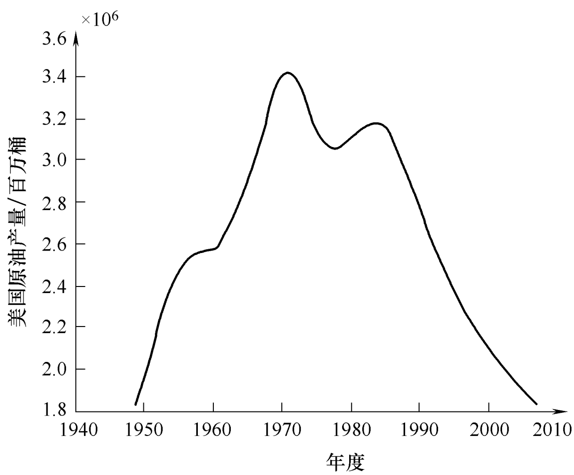


图 1-3　美国 1940～2009 年的石油生产/消费[3]

表 1-1 世界能源探明储量[3,4]

地区	石油		天然气		煤炭	
	2002 年储量/10^9bbl	R/P/年	2002 年探明储量/10^{12}SCF	R/P/年	2002 年探明储量/10^9t	R/P/年
北美	49.9	10.3	52.4	9.4	257.8	240
南美和中美	98.6	42	250.2	68.8	21.8	404
欧洲和欧亚大陆	97.5	17	2155.8	58.9	355.4	306
中东	685.6	92	1979.7	>100	?	>500
非洲	77.4	27.3	418.1	88.9	55.3	247
亚太	38.7	13.7	445.3	41.8	292.5	126
全世界	1047.7	40.6	5501.5	60.7	984.5	204

注：R/P = 储产比；bbl = 桶㊀；SCF = 标准立方英尺。R/P（储产比）表示如果生产以以前各年的速度继续，剩余储量可持续的时间长度。R/P 等于该年底剩余储量除以该年的生产量[4]。（得到世界能源 2009 年 BP 统计评论允许复制）

1.4 一种替代能源：核能

1789 年，德国化学家 Martin Heinrich Klaproth[5] 在沥青铀矿中发现了铀，而法国化学家 Eugène-Melchior Péligot[6] 是第一个把这种金属提取出来的人。然而，法国物理学家贝克勒尔（Antoine Becquerel）[7] 在几乎 100 年后才发现了它的放射性。1934 年，费米（Enrico Fermi）[8] 使用核燃料生产电力工业用的蒸汽。他后来参加制造了第一批用于第二次世界大战的核武器。美国能源部[9] 估计，全世界的铀资源通常被认为足够今后至少数百年使用。

含在汽油等碳氢燃料集合体中的能量实际上低于规模小得多的核燃料所含的能量。核裂变所含的高密度能量使它成为一种重要能源，然而裂变过程会产生放射性核废料。这种放射性产品会留存很长时间，带来核废料处理问题。核裂变作为一种能源产生的碳足迹很低，但却会带来对放射性核废料积累的关注以及政治上不稳定的世界核毁灭的可能性。

㊀ 译者注：bbl——桶（barrel），原油计量用单位，1bbl = 42USgal（美加仑）= 159L = 0.159m^3。

1.5　全球变暖

图 1-4 画出了太阳辐射的入射能量及地表和大气层反射能量的过程。地球大气层的温室气体发射和吸收辐射。这一辐射处于热红外范围内。自从化石燃料燃烧和工业革命开始，大气中的 CO_2 就有了实质性增长，如图 1-5 和图 1-6 所示。温室气体的主要成分是水蒸气、CO_2、CO、臭氧及一些其他气体。温室气体被滞留于地球的大气层内。

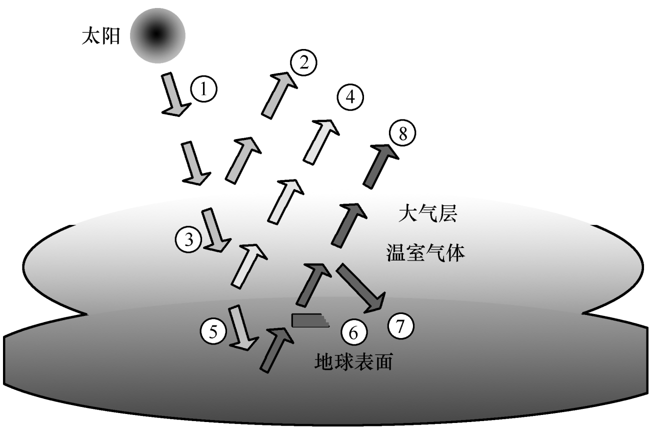


图 1-4　太阳辐射到地球表面的作用

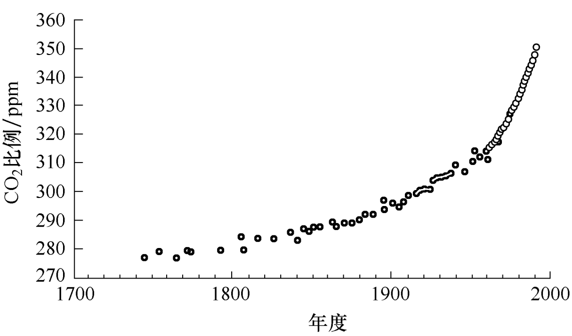


图 1-5　自 1700 年产生的 CO_2（数据取自联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 3 次年度报告[11]）

图 1-4 中，太阳辐射的入射能量用从太阳发射的①表示，它的能量约为 343W/m^2。②和④表示那些太阳辐射从地表和地球大气层反射。太阳辐射的总反射能量约为 103W/m^2。太阳辐射中约 240W/m^2（用③表示）会穿过地球大气层。太阳辐射的

大约一半（⑤），约 168W/m^2，会被地表吸收。辐射分量⑥会转换为热能。这一过程会产生形式为回到地球的长波发射的红外辐射。一部分红外辐射会被吸收。然后，它又会被滞留在地球大气中的温室气体分子再次发射出去。⑦表示红外辐射。最后，某些红外辐射（⑧）会通过大气层进入外太空。随着化石燃料的加速使用，地球大气层中的 CO_2 也加速生成。大气中 CO_2 的增长如图 1-5 所示（单位为百万分之一（ppm））。

世界气象组织（World Meteorological Organization，WMO）[10]是监视气候变化的国际机构。WMO 清楚表述了如果目前趋势继续下去的话，可能产生的环境和社会经济后果。在这一方面，全球变暖是一个工程学问题，而非“道德讨伐”。除非采取措施降低碳足迹，否则污染和环境的危险恶化就将会继续。

图 1-6 画出了上层大气的 CO_2 状况。Y 轴表示响应幅值。X 轴表示未来的年数。表示响应结果的 Y 轴没有单位。大气中的 CO_2 排放将在今后 100 年达到顶峰。如果加强降低 CO_2 排放的努力，并在今后数百年把排放降到低水平，地球温度仍然会继续提高，然而以后会稳定下来。图 1-7 显示了今后几个世纪 CO_2 稳定的情况。

CO_2 含量降低会降低它对地球大气的影响；然而，大气中已有的 CO_2 会继续使地球温度提高零点几摄氏度。地表温度会在今后几个世纪里处于稳定状态，如图 1-8 所示。

地球大气中滞留 CO_2 导致的温度上升会影响海洋的热膨胀。因此海平面会因冰盖融化而上升，如图 1-9 和图 1-10 所示。

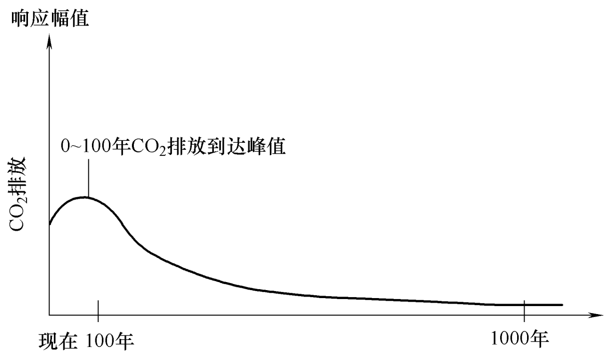


图 1-6　CO_2 浓度提高对温度和海平面的影响（数据取自联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 3 次年度报告[11]）

在今后几个世纪，冰盖会继续因温度上升而融化。图 1-6 ~ 图 1-10 显示了地球状况作为响应水平的函数变化的情况。作为大气中滞留 CO_2 的直接后果，极地冰盖融化会导致海平面上升，使沿海洪水泛滥，我们在地球上的生活方式会被永久性改变。

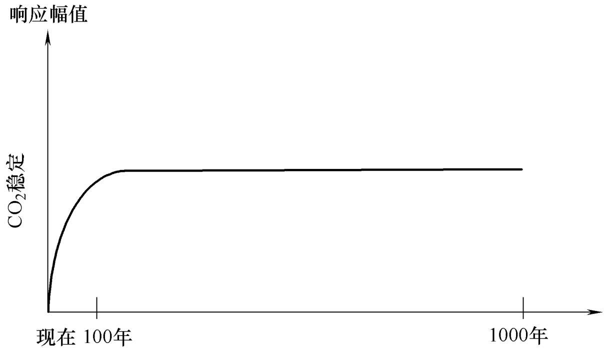


图 1-7　CO_2 排放降低后 CO_2 浓度稳定（数据取自联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 3 次年度报告[11]）

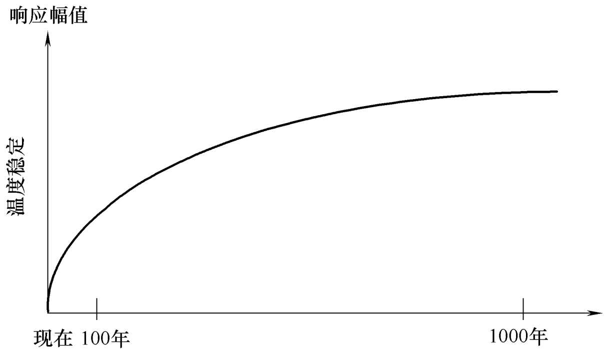


图 1-8　CO_2 排放降低后温度稳定

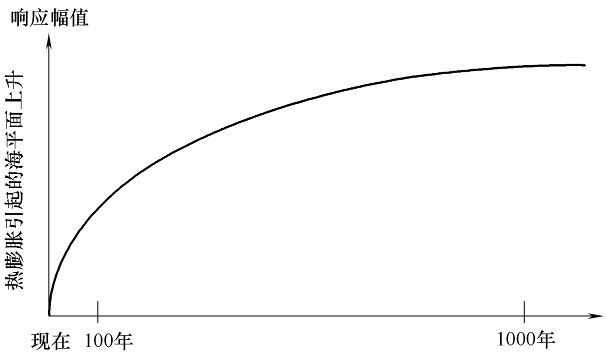


图 1-9　CO_2 排放降低后的海平面上升

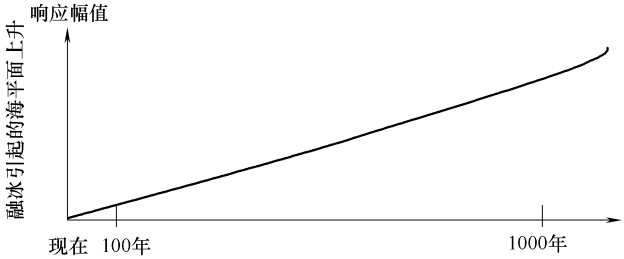


图 1-10 大气中 CO_2 含量降低后的海平面上升

1.6 电力系统时代

丹麦物理学家和化学家奥斯特（Hans Christian Oersted）[12]在 1820 年发现了电磁现象。英国化学家和物理学家法拉第（Micheal Faraday）[13]对电力转换为磁力进行了多年研究。1831 年，法拉第多年的努力得到了回报，他发现了电磁感应现象；此后，他发明了第一台发电机和第一个发生器。后者是一个可以用作 DC 电源的简单蓄电池。1801 年，意大利物理学家伏特（Antonio Anastasio Volta）[14]发明了化学电池。另一个重大技术进步是发现了法拉第感应定律。法拉第被认定于 1831 年发现了感应现象。然而被承认发现感应现象的人和时间还有：1892 年，意大利神父和物理学家 Francesco Zantedeschi[15]；19 世纪 30 年代，美国科学家 Joseph Henry[16]。

特斯拉（Nikola Tesla）[17]是为交流电奠基及应用做出主要贡献的人。使他声名远扬的还有他在 19 世纪晚期和 20 世纪早期在电磁学方面进行的开拓性工作。特斯拉使世界进入了电气化时代。到 20 世纪 20 年代末，使用化石燃料发电的电力已经开始遍布全世界。从那时起，电力一直被用作工具和车辆的动力；为居民、商业和工业系统供热；为我们的日常生活需求提供能量。图 1-11 显示了美国从 1920 ~ 1999 年的发电量[18]。国际能源机构（International Energy Agency，IEA）预测，全世界电力需求的平均年增长率为 2.5%。如果以这一速度增长，到 2030 年，世界能源需求将翻番。IEA 预测，由于发电而产生的 CO_2 排放到 2030 年将增加 75%。2009 年，世界人口接近 68 亿[19]。联合国预测，世界人口到 2030 年将增加到 82 亿。如果人口增长不加控制，新增的 15 亿人需要的电量将相当于目前美国电量消费的 5 倍。

图 1-11 还表明，可以用可再生能源取代化石燃料以及把绿色能源并入电网的方法降低化石燃料发电量的增长。图 1-12 是联合国环境规划署（United Nations Environment Programme，UNEP）发表的平滑平均记录温度。随着印度、巴西及印度尼西亚等国正在使它们的经济现代化，CO_2 的产生还会加速。我们只能希望图 1-12 所示的全球变暖趋势能停下脚步。

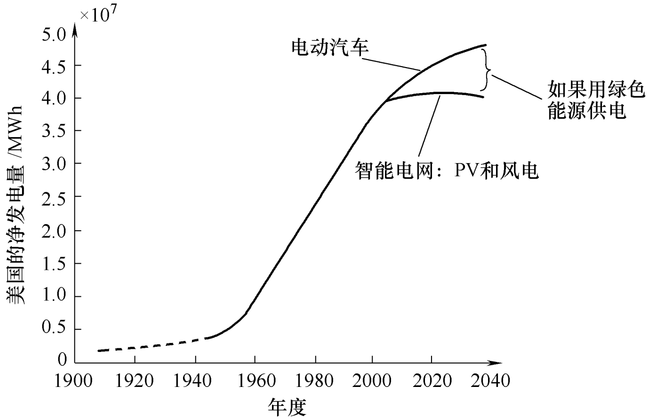


图 1-11 美国 1920～1999 年的发电量[19]

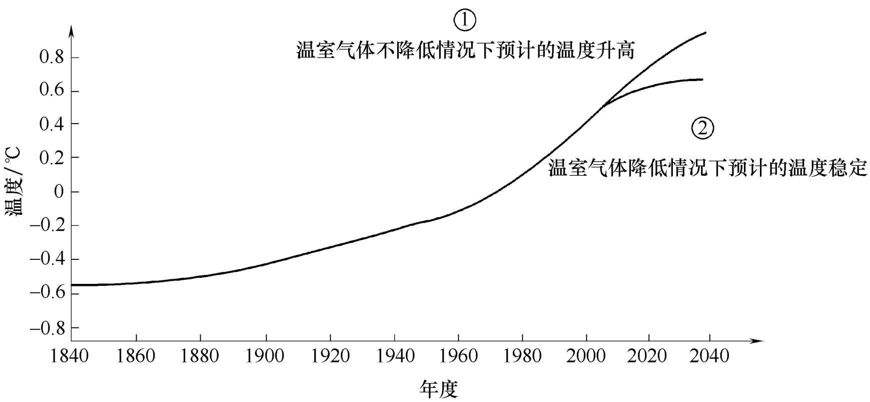


图 1-12 已发表的 1840～2000 年地表温度记录的平滑平均值[20]

1.7 绿色可再生能源

为达到降低碳排放的目标，必须开始使用可再生和可持续的能源。环境友好的运输及固定式发电方法的需求也非常迫切。将来，需要用电动汽车取代传统的基于化石燃料的汽车，用绿色可持续燃料取代煤炭、天然气和石油等传统燃料来获取固定式电力。

1.7.1 氢

除风和太阳等可再生能源之外，氢（H）也是一种重要的清洁可再生能源。氢在宇宙中是无穷无尽的。但氢在空气中含量不高。它是一种无毒、无色、无味的气体。

氢可用作能量的载体，在需要的地点使用、储存和输送。氢在作为能源使用

时，仅产生水和热量，没有碳排放。氢的能量是同量石油的 3 倍[21,22]。氢燃料电池[21]在原理上完全不同于燃烧氢气的发动机。在氢燃料电池中，氢原子分解为质子和电子。氢原子中带负电的电子生成电流，以水（H_2O）为副产品。氢燃料电池用来在固定式发电站发出电能，向居民、商业和工业负荷供电。氢燃料电池也可用于为汽车提供电力，即用作燃氢发动机。基于氢气的能源将来有可能成为一种主要能源，但还有很多应用技术问题需要解决。采用这种技术还需要新的基础设施。

1.7.2　太阳能和光伏发电

太阳能和光伏（PV）能源也是一种重要的可再生能源。太阳是地球的首要能量来源，它发射电磁波。它既发射可见光线，也发射不可见的红外（热量）波。红外（IR）辐射的波长为 0.7～300μm，频率范围约为 1～430THz（$1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$）[23]。阳光用辐照度，即光的辐射能量表示。一个日照强度定义为在海平面提供约 1kW/m^2 辐照度的亮度，而 0.8 日照强度约为 800W/m^2。一个日照强度的能量包括红外（IR）光 523W、可见光 445W、紫外（UV）光 32W。

例 1.1　计算发出 5000kW 功率所需的面积，分别用 m^2 和 ft^2 为单位。假定太阳辐照度等于 0.8 日照强度。

解

PV 在 0.8 日照强度下的功率容量为 0.8kW/m^2

5000kW 容量 $=(0.8\text{kW/m}^2)$㊀ ·（所需面积（m^2））

所需面积（m^2）$=(5000/0.8)\text{m}^2=6250\text{m}^2$

$1\text{m}^2=10.764\text{ft}^2$

所需面积（ft^2）$=6250\times10.764\text{ft}^2=67275\text{ft}^2$

植物、藻类和某些细菌都能捕捉太阳发出的光能，并通过光合作用用 CO_2 和水生产食物（糖）。当太阳的红外热辐射到达地球时，有些热量被地表吸收，而有些热量又重新反射回空间去，如图 1-4 所示。可以使用强反射镜改变来自太阳的热辐射方向作为热能来源。来自太阳的热能（太阳热能）可以以传统方式把水加热到高温并压缩来推动汽轮发电机。

太阳能 PV 电源是用硅材料制成的太阳电池方阵，它可以把太阳辐射转换为直流电力。硅晶片成本很高，但新的吸光材料大大降低了成本。最常见的材料是非晶硅（amorphous silicon，a-Si），它主要是用 O 替代 p 型半导体中的 Si 和 C，而过渡金属主要是 Fe。硅被以各种形态加入，或加入 CdTe（碲化镉）、铜铟硒（CIS）和铜铟镓硒（CIGS）等多晶材料中。PV 组件的前面设计可以使 Si 材料捕获最多光能。每个太阳电池产生的电压约 0.5V。正常情况下，36 个太阳电池串联组成一个

㊀ 译者注：原文误写为（1kW/m^2）。

产生 12V 电压的 PV 组件㊀。

1.7.3　地热能

可再生地热能指地表深处生产的热量。它可以在到达地表的热泉或间歇泉中见到，还有的在地下水池深处。地核是铁的，周围是一层熔岩，即岩浆。地热电站建于地热池上，它的热能主要用于为本地区的家庭及商业供热[24]。

1.7.4　生物质能

生物质能是一种来自农业及林业残骸、城市固体废物和工业废物等有机物的燃料。使用的有机物可能是树木、动物脂肪、植物油、腐烂的废物及污水等。现在，人们把生物柴油等生物燃料与汽油混合作为汽车燃料，或用于供热，也用作发电厂的发电燃料（木材和稻草）。腐烂的废物和污水可以产生沼气，它也是一种生物质能源[25]。然而，对于使用生物燃料有很多争议问题。生产生物燃料可能涉及砍伐森林，把有机物转换为能量可能在更高的碳足迹方面付出高昂的代价，而农产品可能不再用作食物而是转为他用。

1.7.5　乙醇

另一种能源是乙醇。它用玉米和甘蔗生产，也可以使用其他方法生产。然而，碳循环分析和生产“农业”能源使用化石燃料留下了很多悬而未决的问题；就单位面积每年生产的电能来说，太阳能板是玉米乙醇的 100 倍[25]。

如本节的结论所述，要永远记住英国伦敦皇家协会 1662 年的箴言：“不要轻信任何人的话”。

1.8　能量单位及转换

为估计不同层次的化石燃料的碳足迹，需要了解能量单位的转换。因为化石燃料来源不同，我们需要把它们转换为等值能量计量单位，以评估各种能源的使用情况。不同燃料所含的能量用它们可以产生的热量来计量。1Btu㊁（英热单位）所含热量为 252cal㊂（卡），等于 1055J（焦耳）。单位焦耳是以英国物理学家和啤酒制造商 James Prescott Joule[26]（生于 1818 年 12 月 24 日）的名字命名的；他发现了热和机械功之间的关系，从而导致了能量转换基本理论的产生。1Btu 是可以使 1lb（磅）㊃

㊀ 译者注：原文如此。但如果每个太阳电池产生的电压为 0.5V，12V 组件应该由 24 个太阳电池串联。另外，此段后面原文还有一个与例 1.1 完全相同的例 1.2，翻译时已删掉了，后面的例题编号也相应改变。

㊁ 译者注：1Btu = 1055.06J。

㊂ 译者注：1cal = 4.1868J，此处 cal 为 cal_{th}（热化学卡），1cal_{th} = 4.1840J。

㊃ 译者注：lb（pound，磅），英制质量单位，1lb = 0.45359kg。

水温度提高 1℉（华氏度）[㊀]的热量。如计量的能量较大，也使用单位“quad”（1quad = 1015Btu）。

从以前学过的物理学知识中，可以想起公制的 1J 等于在 1N 力作用下通过 1m 距离所做的功（即 1J = 1N × 1m）；它也等于 1W 乘以 1s（即 1J = 1W × 1s）。因此，1J 等于发出 1W 功率持续 1s 所需的功。因此，1W 功率（功率通常用字母 P 表示）等于 3.41Btu/h。

例 1.2[㊁]　计算在 1h 内把 100lb 水加热提高 212°F 所需的功率（以 W 为单位）。

解

所需热量 = 100lb · 212°F = 21200Btu

能量（J）= 21200BTU × 1055J/BTU = 2.2366×10^7J/h = 6212.78J/s

而 1W = 1J/s

∴ P = 6212.78W

在工程学上，功率的定义是

$$P = IV$$

式中，I 表示流过负荷的电流，而 V 表示负荷两端的电压。如果电流的单位是 A，电压的单位是 V，则功率 P 的单位是 W。所以 1kW 等于 1000W。而能量用 kWh 表示，1kWh 是 1kW 功率的负荷 1h 消耗的能量。能量也可以用 J 表示，1kWh = 3.6×10^6J。从化学基础知识可知，1cal = 4.184J。因此，1000kWh = 3.41×10^6Btu。因为电力系统的发动机靠燃烧天然气、石油或煤炭运行，来自这些类型的燃料的能量用 kWh 表示。例如，1000ft^3 的天然气可生产 301kWh 的能量，而 100000Btu 等于 29.3kWh 能量。

例 1.3　[㊂]计算生产 10kWh 能量所需的热量，以 Btu 为单位表示。

解

$$1\text{W} = 1\text{J/s}$$
$$1\text{kW} = 1000\text{J/s}$$
$$1\text{kWh} = 1000 \times 3600\text{J} = 3600\text{kJ}$$
$$10\text{kWh} = 36000\text{kJ}$$
$$1\text{Btu} = 1055.058\text{J}$$

∴ 与 10kWh 相当的热量（Btu）=（36000/1.055085）Btu = 34121.3Btu

煤炭所含能量用它可以产生的 Btu 数值表示。例如，1t 煤可产生 25×10^6Btu 热

㊀ 译者注：华氏度（℉），英美等国常用的温度计量单位，与摄氏度（℃）的转换关系为 $\frac{t}{℃} = \frac{5}{9}\left(\frac{\theta}{℉} - 32\right)$

㊁ 译者注：原书中，本例混淆了能量和功率的概念，译文已做了适当改动。

㊂ 译者注：原书中，本例有些表述错误，译文已做了适当改动。

量；它等于 7325kWh。此外，一桶（42gal[㊀]）石油可产生能量 1700kWh。人们经常使用的单位还有，一桶液化天然气的热量是 1030Btu，$1ft^3$ 天然气的热量是 1030Btu。

例 1.4　计算 10t 煤炭可以生产多少能量（单位为 kWh）。

解

1t 煤 = 25000000Btu

10t 煤 = 250000000Btu

1kWh = 3413Btu

∴ 用 kWh 表示的能量 = 250000000/3413kWh = 73249.3kWh

不同化石燃料和绿色可再生能源生产 1kWh 电量留下的碳足迹分别见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2　不同化石燃料生产 1kWh 电量留下的碳足迹[27]

燃料类型	CO_2 足迹/lb
木材	3.306
燃煤电厂	2.117
燃气电厂	1.915
燃油电厂	1.314
燃气联合循环	0.992

表 1-3　绿色可再生能源生产 1kWh 电量留下的碳足迹[27]

燃料类型	CO_2 足迹/lb
水电	0.0088
PV	0.2204
风能	0.03306

例 1.5　计算居民住宅每天使用 100kWh 煤炭留下的 CO_2 足迹。

解

燃煤电厂生产 1kWh 电量留下的碳足迹是 2.117lb。

居民住宅每天使用 100kWh 煤炭留下的 CO_2 足迹为 100×2.117lb = 211.7lb（CO_2）。

碳足迹可以用碳（C）而不用 CO_2 估计。C 的分子量是 12，而 CO_2 的分子量是 44（C 的原子量 12，加上两个 O 原子的原子量 16×2 = 32，得到的和为 44，就是 CO_2 的分子量）。用 C 表示的排放可以转换为用 CO_2 表示的排放。比值 CO_2/C = 44/12 = 3.67。因此，CO_2 = 3.67C。它的倒数为 C = 0.2724CO_2。

㊀ 译者注：gal（加仑，gallon，简写为 gal）是体积单位，英加仑（UKgal）和美加仑（USgal）不同。这里指美加仑（USgal）。1USgal = 3.785L。

例 1.6 计算如果使用煤炭发电生产 100kWh 电量留下的碳足迹。

解

$$C = 0.2724CO_2$$
$$= 0.2724 \times 211.7\text{lb} = 57.667\text{lb(C)}$$

煤炭的碳足迹是所有化石燃料中最高的。因此，燃煤电厂生产单位电量产生的 CO_2 最多。使用化石燃料还会使其他气体排入大气，它生产单位电量产生的其他气体见表 1-4。

表 1-4 化石燃料每百万 Btu 能量输入的排放水平[27] （单位：lb）

污染物	天然气	石油	煤炭
CO_2	117000	164000	208000
CO	40	33	208
氮氧化物	92	448	457
SO_2	1	1122	2591
微粒	7	84	2744
汞	0.000	0.007	0.016

也可以按照生产电力使用的方法来估计各种电器产生的碳足迹。例如，使用彩色电视机 1h 产生的 CO_2 为 0.64lb（如果用煤炭生产这些电力的话）。对于煤炭来说，这一系数约为 2.3lb（CO_2）/kWh。

例 1.7 一个灯泡的额定功率为 60W。如果该灯泡通电 24h，它消耗的电量是多少？

解

$$\text{消耗电量} = (60\text{W} \times 24\text{h})/1000 = 1.44\text{kWh}$$

例 1.8 估计一下 60W 灯泡点 24h 的碳足迹。

解

$$\text{碳足迹} = 1.44\text{kWh} \times 2.3\text{lb}(CO_2)/\text{kWh} = 3.3\text{lb}(CO_2)$$

如果不考虑碳足迹和对环境的损害，大型燃煤电厂的经济性很好。一般来说，单位电量的成本与单机容量成反比关系。例如，100kW 机组的单位成本对燃烧天然气的机组是 0.15 美元/kWh，对 PV 发电来说是 0.30 美元/kWh。因此，如果忽略对环境的恶化作用，以目前化石燃料价格计，燃烧化石燃料生产的电力比较便宜。对于大型燃煤电厂，单位电量的成本为 0.04～0.08 美元/kWh。绿色能源技术需要政府政策支持来推广使用绿色能源的绿色发电。为减轻发展中世界的生态碳足迹，需要在发展经济时采用绿色能源政策。

在燃烧木材和木炭数千年后，在工业革命前夜的 1850 年，CO_2 的浓度为 288ppmv（体积比）。而到 2000 年底，CO_2 的浓度已经增长到 369.5ppmv，即在过去的 250 年中增长了 37.6%。CO_2 浓度的指数增长与电力生产密切相关（见图 1-4 和图 1-6）。

1.9　电量成本估计

如我们已经讨论过的，电量成本用功率乘以使用时间来计量。任何电器所需的功率都标注在电器上，或包含在它的有关文件中，或标注在它的铭牌上。然而，一个电器消耗的电量也是它的施加电压和运行频率的函数。因此，制造商在它生产的电器铭牌上要给出电压、功率和频率的额定值。对于纯阻性的灯泡，它的电压和功率额定值标注在灯泡上。一个灯泡的额定值可能是 50W 和 120V。这意味着，如果给灯泡施加 120V 电压，它消耗的功率将为 50W。

此外，消耗的功率也可表示为

$$P = V \cdot I \tag{1-1}$$

式中，消耗功率 P 的单位是 W，V（电压）的单位是 V，I（电流）的单位是 A。

能量消耗的速度可写为

$$P = \frac{\mathrm{d}E^{㊀}}{\mathrm{d}t} \tag{1-2}$$

于是可以写出负荷（即电器）消耗的能量为

$$E = P \cdot t \tag{1-3}$$

上述 E 的单位是 J 或 Ws。然而，单位电量的成本表示为美元/kWh，所以消耗的电量 kWh 表示为

$$\mathrm{kWh} = \mathrm{kW} \times \mathrm{h} \tag{1-4}$$

因此，如果用 λ 表示电量成本（单位为美元/kWh），则总成本可表示为

$$\text{电量成本（单位为美元）} = \mathrm{kWh} \times \lambda \tag{1-5}$$

例 1.9　假设你想买一台计算机。你看了两种计算机：第一种（A）的额定值是 400W，120V，价格 1000 美元；第二种（B）的额定值是 100W，120V，价格 1010 美元。电力公司的电价是 0.09 美元/kWh。你关心的是总价格，即购买计算机的成本加使用成本，假如你使用计算机 3 年，每天使用 8h。

解

3 年中每天使用 8h，则总使用时间是

$$\text{使用时间} = 8 \times 365 \times 3\mathrm{h} = 8760\mathrm{h}$$

计算机 A 消耗的电量 = 使用时间 × A 的功率 = 8760h × 0.4kW = 3504kWh

计算机 B 消耗的电量 = 使用时间 × B 的功率 = 8760h × 0.1kW = 876kWh

计算机 A 的总成本 = A 的电费 + A 的购买成本 = 3504 × 0.09 美元 + 1000 美元 = 1315.36 美元

计算机 B 的总成本 = B 的电费 + B 的购买成本 = 876 × 0.09 美元 + 1010 美元 =

㊀ 译者注：原书式（1-2）和式（1-3）中的能量用字母 W 表示，会与功率单位 W 混淆，译文按我国惯例改为 E。

1088.84 美元

因此，计算机 B 的使用加购买的总成本远低于计算机 A，因为 B 的耗电量要低得多。尽管计算机 A 的价格较低，但买计算机 B 更经济，因为它的使用成本要比 A 低得多。

例 1.10 对于例 1.9，假定电力是用煤发出的，那么它在 3 年中向环境排出的 CO_2 有多少磅（lb）？它的碳足迹情况如何？

解

由表 1-4，对于煤炭，每 10 亿 Btu 输入能量排放的 CO_2 是 208000lb。

$1\text{kWh} = 3410\text{Btu}$

计算机 A 在 3 年中消耗的能量为 $3504 \times 3410\text{Btu} = 11948640\text{Btu}$

$\therefore$ 计算机 A 的 CO_2 排放 $= \dfrac{11948640 \times 208000}{10^9}\text{lb} = 2485.32\text{lb}$

计算机 B 在 3 年中消耗的能量为 $876 \times 3410\text{Btu} = 2987160\text{Btu}$

$\therefore$ 计算机 B 的 CO_2 排放 $= \dfrac{2987160 \times 208000}{10^9}\text{lb} = 621.33\text{lb}$

计算机 B 的碳足迹要低得多。

例 1.11 假如你购买了一台带游戏卡和老式显像管监视器的大功率计算机。假设它的消耗功率是 500W，发电使用的燃料是石油。计算：

1）如果你每天 24h 都让它通电，它的碳足迹是多少？

2）如果每天仅通电 8h，它的碳足迹是多少？㊀

解

1）一年的小时数 $= 24 \times 365\text{h} = 8760\text{h}$

$$\begin{aligned}\text{一年耗电量} &= 8760 \times 500 \times 10^{-3}\text{kWh} = 4380\text{kWh} \\ &= 4380 \times 3.41 \times 10^3\text{Btu} = 14935800\text{Btu}\end{aligned}$$

由表 1-4，对于石油，每 10 亿 Btu 能量输入的 CO_2 排放是 164000lb。

因此，一年的碳足迹 $= \dfrac{14935800 \times 164000}{10^9}\text{lb} = 2449.47\text{lb}$

2）对于每天仅使用 8h 的情况

碳足迹 $= \dfrac{8}{24} \times$ 每天使用 24h 的碳足迹 $= \dfrac{1}{3} \times 2449.47\text{lb} = 816.49\text{lb}$

1.10 小结

本章简单介绍了能源及其使用的历史。人类文明的发展是驾驭地球上能源的直接结果。人类使用风能、太阳能及木材已经有数千年历史。然而，随着煤炭、石油

㊀ 译者注：原文此处的描述（“每天 8h 不通电”）与解中的内容不一致，现已改正。

和天然气等新的能源的发现，我们不断用新的能源替代旧的能源。

全球变暖及环境恶化迫使我们重新审视能源使用情况及带来的碳足迹，这就是本章要说明的课题。以后几章要研究电力系统运行、建模及智能电网的基本概念，还有智能微电网租赁式能量系统的设计。

习　题

1.1　做一份作业。用 3000 个单词写一份概括京都议定书内容的报告。计算 2020 年 CO_2 排放的简单运行差额，假如一个 6000MW 的系统负荷由 10 台单机容量为 100MW 的燃煤机组、10 台单机容量为 50MW 的燃油机组和 10 台单机容量为 50MW 的燃气机组供电。

1）6000MW 系统负荷全部由燃煤机组供电；

2）6000MW 系统负荷由燃气机组、风电和太阳能发电均衡供电。

1.2　使用表 1-4 给出的数据，进行以下计算：

1）500W 的碳足迹，如果用煤发电；

2）500W 灯泡的碳足迹，如果用天然气发电；

3）500W 灯泡的碳足迹，如果用风力发电；

4）500W 灯泡的碳足迹，如果用 PV 发电。

1.3　计算使用 18W 荧光灯替代 60W 白炽灯一个月省下的钱，假如电价为 0.12 美元/kWh，每天使用照明 10h。

1.4　计算习题 1.3[㊀] 中两种灯的碳足迹，假如发电用燃料是天然气。如果使用的燃料是煤炭，碳足迹会加大多少？

1.5　一台额定值为 240V，1200W 的电炉接到 120V 电压是否能给出同样的热量？如果不能，它现在消耗的功率是多少？

1.6　如果 PV 电池发电的 CO_2 排放系数是 100g/kWh，风力发电是 15g/kWh，而燃煤发电是 1000g/kWh，如果（a）15% 电力来自风电场；（b）5% 电力来自 PV 电源；（c）其他电力来自燃煤，求与全部电力都由燃煤电厂发出相比的 CO_2 排放比。

1.7　一座发电厂有 3 台机组，它们的技术参数见下表。计算运行 1 年它们的运行排放差额。

机 组 编 号	发电容量/MW	CO_2 排放系数/(lb/kWh)
1	160	1000
2	200	950
3	210	920

1.8　如果建设一座 100MW 火电厂的初始成本为 2000000 美元，而建设同样容量的 PV 电厂成本为 300000000 美元。火电厂的运行成本为 90 美元/MWh，而 PV 电厂的运行成本为 12 美元/MWh。求 PV 电厂比火电厂更经济需要的年数，假定两者的容量利用率都是 90%。

1.9　考虑一个额定电压为 120V，为 5 个灯泡供电的电源。负荷的额定值是 120V，120W。所有照明负荷都是并联的。如果电源电压降低 20%，计算以下问题：

㊀ 译者注：原文为“计算习题 1……”，现按题意改为“计算习题 1．3……”。

1）负荷从电源消耗的功率（单位 W）；

2）由于电源电压降低导致的照度降低百分数；

3）碳足迹数量，如果用煤发电。

1.10　如习题 1.9，但又在电源上接了电冰箱负荷，其额定值也是 120V，120W，而且电压下降 30%。

1）计算负荷消耗的功率（W）；

2）由于电源电压降低导致的照度降低百分数；

3）你估计接到电源的负荷会受到损坏吗？

4）计算如果用煤发电产生的碳足迹数量。

［提示：40W 白炽灯产生的照度约为 500lm（流明）］

1.11　如习题 1.9，但又在电源接入电冰箱负荷，其额定值也 120W，而电压提高 30%。

1）计算负荷消耗的功率（W）；

2）由于电源电压升高导致的照度提高百分数；

3）你估计接到电源的负荷会受到损坏吗？

4）计算如果用煤发电产生的碳足迹数量。

1.12　发电厂一台机组 1 年消耗的燃料为 3×10^5t 煤炭，1×10^5 桶石油和 8×10^5ft^3 天然气。它在此期间的平均功率为 210MW。使用以下数据和表 1-4 数据计算该机组每 Btu 排放的 CO_2 数量（lb）：1t 煤炭的热量为 2.5×10^7Btu；1 桶（即 42gal）石油的热量为 5.6×10^6Btu；1ft^3 天然气的热量为 1030Btu。

参考文献

1. California Energy Commission. Energy quest, the energy story. Fossil fuels—coal, oil and natural gas (Chapter 8). Available at http://www.energyquest.ca.gov. Accessed 2010 Sept 26.
2. Durant W. The story of civilization. Available at http://www.archive.org/details/storyofcivilizat035369mbp. Accessed 2010 Nov 9.
3. Brown LR. Mobilizing to save civilization. Available at http://www.earth-policy.org/index.php?/books/pb4/pb4_data. Accessed 2010 Nov 9. (This is part of a supporting dataset for: Brown LR, Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization. New York: W.W. Norton & Company, 2009. For more information and a free download of the book, go to http://www.earthpolicy.org/datacenter/pdf/book_pb4_ch4-5_all_pdf.pdf.)
4. BP Statistical Review of World Energy—June 2010. Available at http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf. Accessed 2009 Sept 20.
5. Encyclopædia Britannica. Martin Heinrich Klaproth. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/319885/Martin-Heinrich-Klaproth. Accessed 2010 Nov 9.
6. Encyclopædia Britannica. Eugène-Melchior Péligot. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/449213/Eugene-Peligot. Accessed 2010 Nov 9.
7. Encyclopædia Britannica. Antoine-César Becquerel. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/58017/Antoine-Cesar-Becquerel. Accessed Nov 9.
8. Encyclopædia Britannica. Enrico Fermi. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/204747/Enrico-Fermi. Accessed 2010 Nov 9.

9. Congressional Research Service. Managing the nuclear fuel cycle: policy implications of expanding global access to nuclear power (updated January 30, 2008). Available at http://www.nuclear.energy.gov/pdfFiles/rpt_ManagingtheNuclearFuelCyclePolicy.pdf. Accessed 2010 Nov 9.
10. World Meteorological Organization. Arctic surface-based sea-ice observations: integrated protocols and coordinated data acquisition. Available at http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/documents/CliCASWSreportfinal.pdf. Accessed 2010 Nov 9.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. IPCC Third Annual Report. Available at http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/vol4/english/index.htm. Accessed 2010 Sept 27.
12. Encyclopædia Britannica. Hans Christian Ørsted. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/433282/Hans-Christian-Orsted. Accessed 2010 Nov 9.
13. Encyclopædia Britannica. Michael Faraday. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/201705/Michael-Faraday. Accessed 2010 Nov. 9.
14. Available at Conte Alessandro Volta. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/632433/Conte-Alessandro-Volta. Accessed 2010 Nov 9.
15. The contribution of Francesco Zantedeschi at the development of the experimental laboratory of physics faculty of the Padua University. Available at http://www.brera.unimi.it/sisfa/atti/1999/Tinazzi.pdf. Accessed 2010 Nov 9.
16. Encyclopædia Britannica. Joseph Henry. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/261387/Joseph-Henry. Accessed 2010 Nov 9.
17. Encyclopædia Britannica. Nikola Tesla. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/588597/Nikola-Tesla. Accessed 2010 Nov 9.
18. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov. Accessed 2010 Sept 26.
19. Population Reference Bureau. World population data. Available at http://www.prb.org/pdf10/10wpds_eng.pdf. Accessed 2010 Nov 9.
20. Manitoba Eco Network. Climate change observations. Available at http://www.climatechangeconnection.org/Science/Observations.htm. Accessed 2010 Nov 9.
21. The Open University. The potential of fuel cells to reduce energy demands and pollution from the UK transport sector. Available at http://oro.open.ac.uk/19846/1/pdf76.pdf. Accessed 2010 Oct 9.
22. Stanford University. Hydrogen FQA sustainability. Available at http://www.formal.stanford.edu/jmc/progress/hydrogen.html. Accessed 2010 Nov 9.
23. Hockett RS. Analytical techniques for PV Si feedstock evaluation. Paper presented at the 18th workshop on Crystalline Silicon Solar Cells &Modules: Material and Processes, Vail, CO, August 2008.
24. Earth Policy Institute. Climate, energy, and transportation. Available at http://www.earth-policy.org/data_center/C23. Accessed 2010 Nov 9.
25. Patzek TW. Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6), 519–567.
26. Encyclopædia Britannica. James Prescott Joule. Available at http://www.britannica.com/EBchecked/topic/306625/James-Prescott-Joule. Accessed 2010 Nov 9.
27. Low Impact Life Onboard. Carbon footprints. Available at http://www.liloontheweb.org.uk/handbook/carbonfootprint. Accessed 2010 Nov 9.

第 2 章　电　　网

2.1　引言

电网向家庭和企业的最终用户提供电力。电网中消耗电力的所有设备都称为负荷。在居民用电力系统中，这种负荷包括空调、照明、电视机、电冰箱、洗衣机及洗碗机等。工业负荷是复合型的，其中感应电动机是这些负荷中的大宗。商业用负荷主要是照明、办公用计算机、复印机、激光打印机及通信系统。所有电气负荷都运行于标称额定电压。每个负荷的标称额定电压都由制造商确定，以保证其安全运行。在电网分析中，要研究如何设计电力网络，以保证其负荷运行于它们的额定电压，最大偏差不超过其标称额定值的 ±5%。

本章将介绍电网负荷的基本概念，介绍单相负荷、三相负荷、变压器、配电系统、输电，以及使用广义标幺值概念为电网建模。以后各章将讨论智能微电网和绿色可再生能源并入大型互联电网。

2.2　电网

2.2.1　背景

如果不对发电厂进行规划设计，不建设数千英里的输电线路，不每时每刻对向负荷供电的发出电力进行控制，我们所依赖的稳定、可靠的电力系统将不会存在。没有全世界 20 世纪初发生的快速电气化，现代工业化社会就不会发展[1]。

尽管我们承认托马斯·爱迪生（Thomas Edison）是一位不知疲倦的发明家并在 1882 年设计了第一个直流（DC）发电设备[2,3]，但我们相信是尼古拉·特斯拉（Nicola Tesla）发明和设计了电网。特斯拉开发了与爱迪生竞争的基于交流（AC）的电力系统[2,3]。交流电可以转换为高压并远距离输送。这种系统如今仍在使用。

Charles Curtis 于 1903 年在美国罗德岛州纽波特（Newport，Rhode Island）设计了第一台汽轮发电机[3,4]。但直至 1917 年，人们才建设了第一条远距离交流高压输电线，然后，该输电线继续延伸，跨越州际边界，成为美国常见的电力网络。

图 2-1 是 21 世纪美国的发电构成概况。

按照美国能源部（DOE）的统计[3]，从 2006 年到 2007 年，美国的净发电量从 4065TWh 增长到 4157TWh㊀。这一增长主要来自使用煤炭、天然气和核能发出的电力。2007 年基于煤炭发出的电力为 2016TWh，基于天然气发出的电力为 897TWh，而基于核能发出的电力是 806TWh[4]。可再生能源（如太阳能和风能）发电的份额仅占约 2.5%。

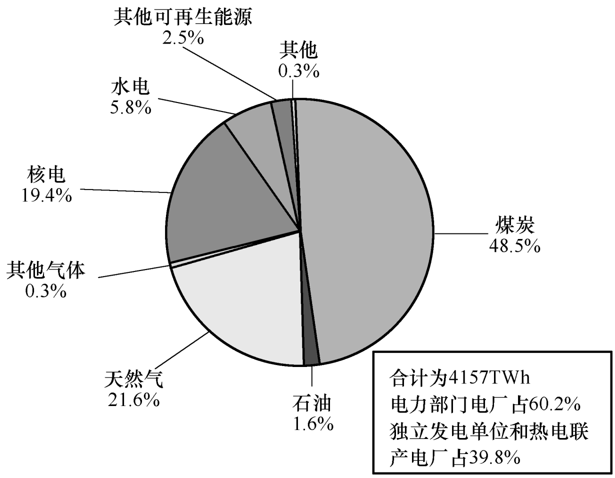


图 2-1　美国电力行业 2007 年的净发电量[4]

（来源：美国能源信息管理局，2007 年电力年报）

2.2.2　电网系统的结构

电力系统是一个从供电方到用电方输送电力的输配电系统网络。电网用来发电、输电和配电的方法多种多样。20 世纪 70 年代发生能源危机之后，美国联邦政府于 1978 年发布了旨在提高能源效率、改善供电可靠性的公用事业监管政策法令（Public Utility Regulatory Policies Act，PURPA）。PURPA 要求电网向小型独立电力生产者开放。电力行业解除监管之后，很多电网公司的发电部门都作为单独的企业分支在运营。新的发电公司也作为独立电力生产者（Independent Power Producer，IPP）进入电力市场：IPP 生产的电力由电力部门以批发价购买。如今，电网的发电厂由 IPP、电力公司和市政当局所有。终端用户接到电网公司的配电系统，以零售价购电。

㊀ 译者注：原文说美国 2007 年净发电量为“234157TWh”，显然有误。且原文中用于表示数字的逗号和句号比较混乱（见图 2-1 中的总发电量）。现参照相关信息并将图 2-1 与正文对比对它们做了更正。

被输电线路连接到一起的各电力公司被称为互联。互联网络也被电力公司用来支持和提高电网的可靠性，以利于稳定运行和降低成本。如果一个电力公司由于不可预见事件导致电力短缺，它可以通过互联系统从邻近公司购买电力。建设大容量（如500MW左右）发电站要花5～10年时间。建设这类发电站之前必须获得政府许可。在决定建设发电厂之前，股东、当地电力公司和IPP会进行经济评估，以确定寿命期间的电量成本，与其他电力生产者的电价比较。

在解除监管的电力产业下，发电与电量成本由供需双方决定。在美国和世界上大部分国家，互联电网已经解除监管，并向所有电力生产者开放。互联电网的控制由独立系统运营商（Independent System Operator，ISO）实施。ISO主要关注保持电网系统的负荷与发电的瞬时平衡，以确保系统稳定。ISO实施其功能的方法是控制和调度成本最低的发电机组，使发出电量与系统负荷相匹配。第4章将研究电网运行。

在历史上，发电厂都远离居民稠密区。发电厂建在有水、有燃料（通常是煤炭）的地方。建设大规模发电厂的目的是利用其规模效益。发出电力的电压范围是11～20kV，然后升压接入大功率互联输电系统。

高压（HV）输电线的电压范围为138～765kV。这些线路通常是架空线。然而，在大城市也使用地下电缆。线路导线是铜或铝的。大功率输电主要关注的是由导线电阻产生热量导致的输电线功率损失。功率可表示为电压值乘以电流值。用较高电压输送相同功率只需使用较小电流，因而需要的导线截面积也较小，从而可以减少线路损耗。配电线路通常指额定电压低于69kV的线路。

大功率输电线路可类比于把大量电力沿高压线路输送的能源产业高速公路。而高压线路则把关键地点互联。电压为110～132kV的高压输电线被称为次输电线路。图2-2中，次输电线路用于向工厂和大型工业设施供电。燃气轮机发电厂向次输电系统供电的情况如图2-2所示。

配电系统的作用是向馈电线和最终用户供电。配电变压器高压侧接到输电系统或次输电系统。配电电压范围为120V、208V、240V和480V。配电系统的供电电压取决于负荷需要的供电容量。较大的商用负荷使用480V电压。

图2-3画的是一个五母线系统。图中，有2台发电机接到母线（节点）1和2。把发电机接到大功率网络的升压变压器没有画出。负荷中心位于母线（节点）3、4和5。这里使用术语母线是因为这些互联点是连接发电机、负荷和线路等电网元件的铜排。所有母线（节点）都位于变电站内。图2-3显示，母线1接有一台发电机和一条线路。

发电机的作用是生产三相交流电（AC）。由图2-4可见，发电机的3个正弦分布绕组（线圈）承载的电流是相同的。

图2-4显示了正弦电压（或电流）随时间的变化。它的时间轴标示为0°～360°（2πrad）。世界上的所有电力系统都运行于每秒50或60个循环的固定频

率。基于通用的颜色代码惯例[6]，黑色用于三相系统中的一相，表示与以地为基准相位的相位差为 0°。红色用于第二相，它与黑色相的相位差是 120°。蓝色用于第三相，它与黑色相的相位差也是 120°。图 2-4 显示了这种每相的颜色表示。

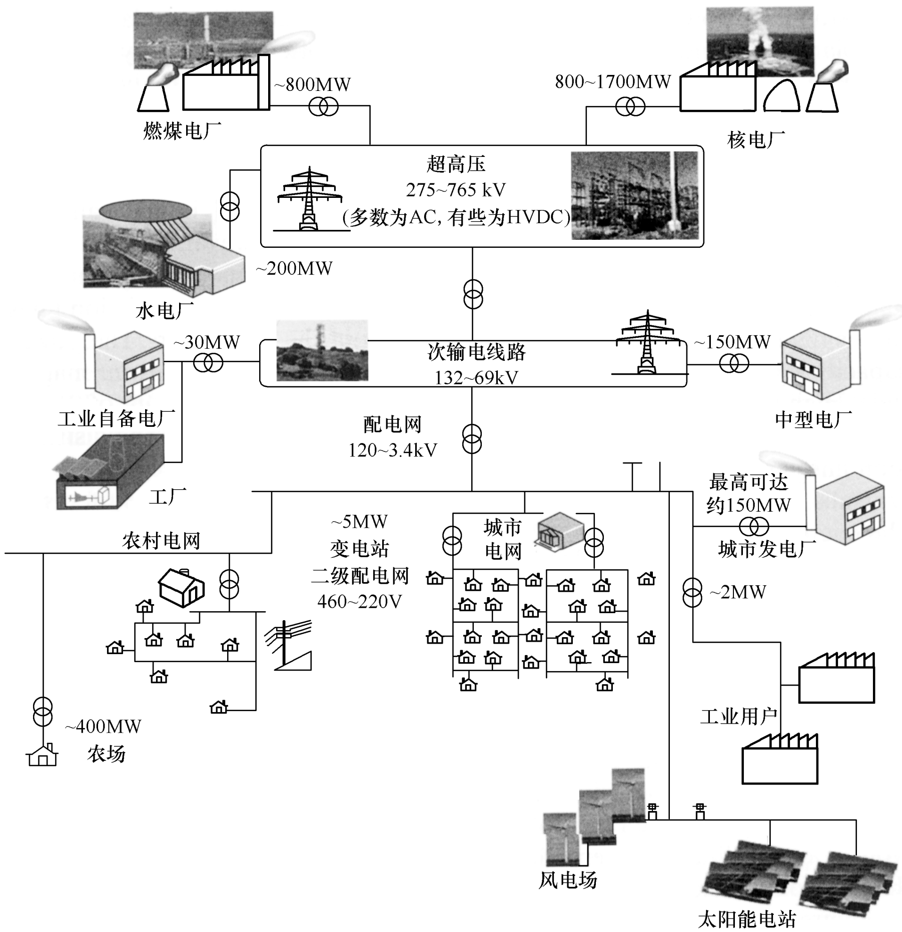


图 2-2　绿色能源高度渗透的互联电网[6]

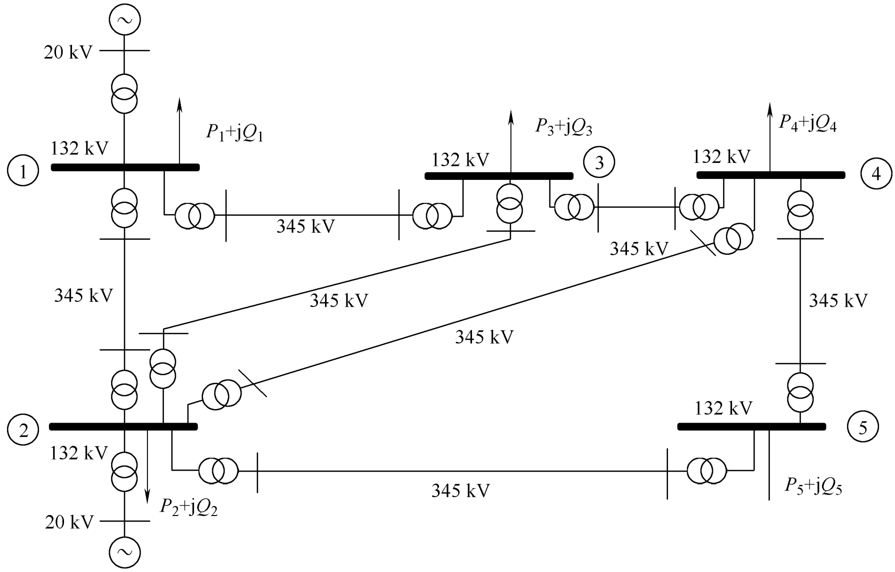


图 2-3　一个五母线大功率电网

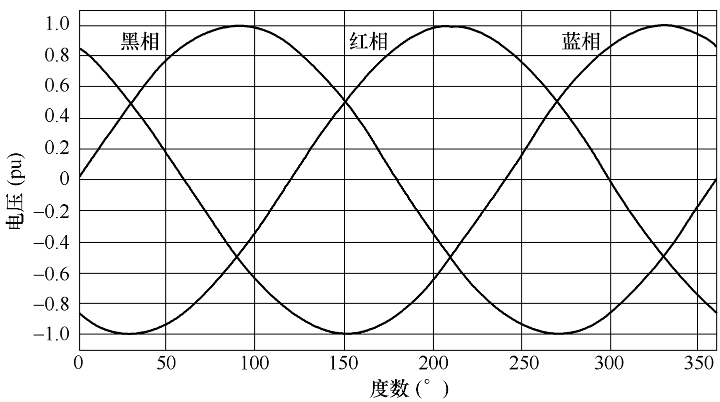


图 2-4　三相发电机的电压波形[7]

2.3　电网的基本概念

2.3.1　常用术语

首先定义几个常用术语。

1）导线可以承载的最大水平的电流定义为它的载流容量；该值是导线截面积的函数。

2）电网元件的功率容量以单位伏安（VA）表示。

3）1000VA = 1kVA。

4）1000kVA = 1MVA。

5）能量是负荷功率乘以一定时间；它的单位是千瓦时（kWh）。

6）1000kWh = 1MWh。

7）1000MWh = 1GWh。

2.3.2　消耗功率计算

直流电路消耗的功率可计算为

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R} = I^2 R \tag{2-1}$$

要计算单相交流电路的功耗，需用电流的共轭复数乘以负荷上的电压。

$$S = V \cdot I^* = |V||I| \angle(\theta_V - \theta_I) \tag{2-2}$$

式（2-2）中，I 和 V 是电流和电压的方均根值。功率因数（pf）可根据电流和电压之间的夹角计算，并以电压为基准相量。

$$pf = \cos(\theta_V - \theta_I)$$

$$Z = \frac{|V| \angle \theta_V}{|I| \angle \theta_I} \tag{2-3}$$

式（2-3）中，θ 也称为阻抗角，$\theta = \theta_V - \theta_I$，复功率有两个分量：有功功耗 P 和无功功耗 Q，如式（2-4）所示。

$$S = |V||I|(\cos\theta + \mathrm{j}\sin\theta) = P + \mathrm{j}Q \tag{2-4}$$

对于复功率来说，负荷上的电压可表示为 $V = I \cdot Z$。

因此，复功率可表示为

$$S = V \cdot I^* = I \cdot Z \cdot I^* = |I|^2 Z \tag{2-5}$$

$$S = V \cdot I^* = V\left(\frac{V}{Z}\right)^* = \frac{|V|^2}{Z^*} \tag{2-6}$$

现在看一下图2-5所示的基本感性电路 R-L。

图2-5所示的电路使用标准极性表示法。每个元件都标上一个正号和一个负号。使用这种标记有利于应用基尔霍夫电压定律。正极性端子表示电路中电流流入的方向。例如，在这一电路中，电源电压的升高是从负极性端子到正极性端子。它等于电路中电阻和电感上的电压降。

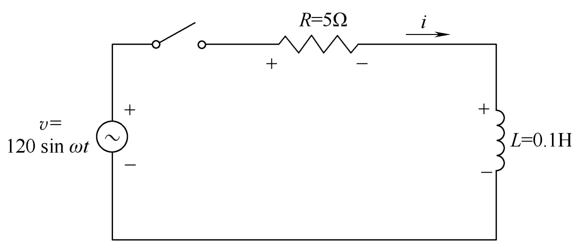


图2-5　一个 R-L 电路

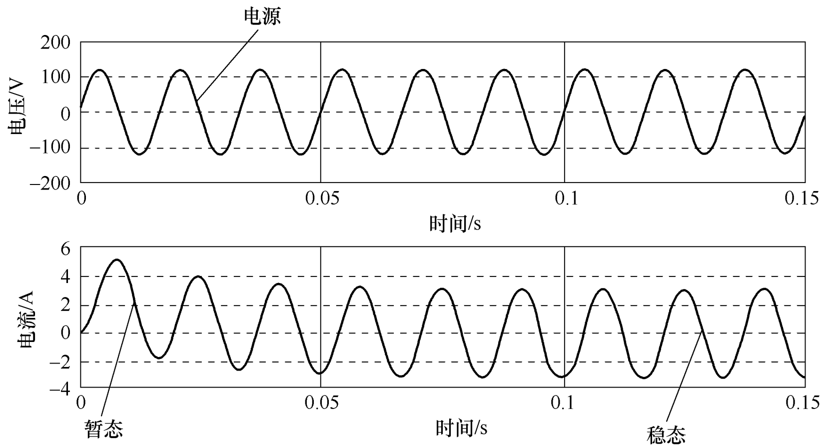


图 2-6　图 2-5 电路的电压和电流响应

如果在 $t=0$ 时开关闭合，则响应电流可用如下微分方程表示。

$$v = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{2-7}$$

式中，v 和 i 分别是电压和电流的瞬时值。经过一段时间，电流会达到稳态。这种情况如图 2-6 所示。

稳态时，v 和 i 可以用相量形式表示为 V 和 I。本书关注的是稳态运行下电网的设计。R-L 电路的稳态运行可表示为

$$V = V_{\mathrm{rms}}\angle\theta_V \quad V_{\mathrm{rms}} = \frac{120}{\sqrt{2}}$$

$$I = I_{\mathrm{rms}}\angle\theta_I \quad \theta_I = \omega t + \theta_{I,0}$$

式中，V 是方均根值；θ_V 是 V 的相角；θ_I 是 I（方均根值）的相角。θ_I 由 θ_V 和阻抗角 θ 决定：$\theta_I = \theta_V - \theta$。而 $\theta_{I,0}$是电流的初相角。

$$I = I_{\mathrm{rms}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t + \theta_{I,0})} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} = \mathrm{j}\omega I_{\mathrm{rms}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t + \theta_{I,0})} = \mathrm{j}\omega I$$

上述微分方程的稳态形式为

$$V = (R + \mathrm{j}\omega L)I \tag{2-8}$$

令 $X_{\mathrm{L}} = \omega L$，代表电感的电抗，则

$$V = (R + \mathrm{j}X_{\mathrm{L}})I \tag{2-9}$$

令 $Z = R + \mathrm{j}X_{\mathrm{L}} = |Z|\angle\theta$，$\theta = \arctan\left(\frac{X_{\mathrm{L}}}{R}\right) > 0$，则 $\theta_V - \theta_I = \theta$。

通常选取 V 作为基准相量，于是 $\theta_V = 0°$，

$$V = |V|\angle 0°, \quad I = \frac{V}{Z} = |I|\angle -\theta$$

因此，电源对感性负荷的供电功率可表示为

$$S = VI^* = |V||I|\cos\theta + \mathrm{j}|V||I|\sin\theta = P + \mathrm{j}Q \tag{2-10}$$

从以上定义可以看出，感性负荷的功率因数是滞后的。因此，电源需要向该负荷提供无功功率。感性负荷会消耗电源提供的无功功率。这种情况可表示为

$$S = VI^* = (R + \mathrm{j}X_\mathrm{L})I \cdot I^* = |I|^2 R + \mathrm{j}|I|^2 X_\mathrm{L} = P + \mathrm{j}Q$$

现在看一下图 2-7 给出的 *R*- *C* 电路。

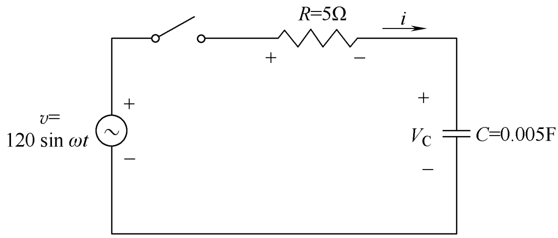


图 2-7　一个提供交流电源的 *R*- *C* 电路

如果在 $t=0$ 时开关闭合，则系统的微分方程可表示为

$$v = RC\frac{\mathrm{d}v_\mathrm{C}}{\mathrm{d}t} + v_\mathrm{C} \tag{2-11}$$

式（2-11）中的 v 和 v_C 都是瞬时值。经过一段时间之后，暂态响应衰减到零，电容器上的电压达到稳态，如图 2-8 所示。

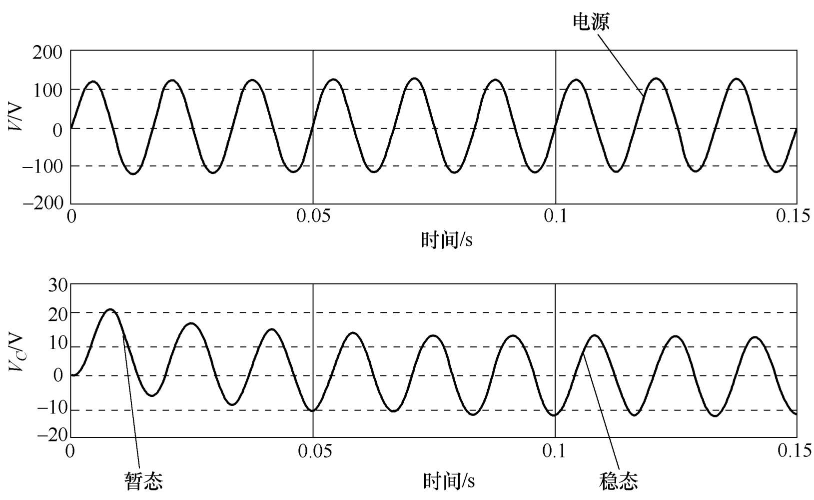


图 2-8　图 2-7 电路的电压响应（*V*）和电容器电压响应（V_C）

稳态下的电源电压 *V* 和电容器电压 V_C 可以用相量 *V* 和 V_C 表示。现在，应该注意到，用大写字母 *V* 和 *I* 表示方均根值。

$$V = V_\mathrm{rms}\angle\theta_V \quad V_\mathrm{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}}$$

$$V_C = V_{C,rms} \angle \theta_{V_C}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = j\omega V_C \quad I = C\frac{dV_C}{dt} = j\omega C V_C$$

由此可知，

$$V_C = I\left(\frac{1}{j\omega C}\right) = I\left(-j\frac{1}{\omega C}\right)$$

对于图 2-7 的 R-C 电路，有

$$V = \left(R - j\frac{1}{\omega C}\right)I$$

$$V = (R - jX_C)I$$

式中，X_C 是电容器的电抗 $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$。

令 $Z = R - jX_C = |Z| \angle -\theta$

于是 $\theta = \arctan\left(\dfrac{X_C}{R}\right)$

因为选择负荷电压 V 为基准，并令 $\theta_V = 0°$，所以 $\theta_V - \theta_I = -\theta$。于是

$$V = |V| \angle 0°, \quad I = \frac{V}{Z} = |I| \angle \theta$$

因此，对于容性负荷，通过电容器的电流超前于电压。交流电源提供的功率可表示为

$$S = VI^* = |V||I|\cos\theta - j|V||I|\sin\theta = P - jQ \tag{2-12}$$

容性负荷会向电源提供无功功率。也可以把复功率写为

$$S = VI^* = (R - jX_C)I \cdot I^* = |I|^2 R - j|I|^2 X_C = P - jQ \tag{2-13}$$

功率因数可根据电压和电流计算。其中电压是基准相量，功率因数 $pf = \cos(\theta_V - \theta_I)$，再加上代表超前（正号）或滞后（负号）的符号。即对于感性负荷，负荷电流落后于电压；而对于容性负荷，负荷电流会超前于电压。因为阻抗是电压除以流经阻抗的电流的比值，所以感性负荷阻抗的相角为正，而容性负荷的相角为负。

住宅光伏系统（用 PV 表示）等可再生能源系统的发电量不大，通常在 5 ~ 10kVA。因此可以用单相系统把电力配送给负荷。然而，如果要想配送 MW 级 PV 系统发出的功率，就需要使用三相交流系统。

三相交流系统可视为 3 个单相电路。最早一批交流发电机就是单相的。但人们认识到，三相发电机可以发出 3 倍电量。然而相数更多的发电机并不能成正比地发出更多电量[8]。

考虑图 2-9 的三相四线系统。

图 2-10 画出的是平衡三相电压。通常，三相系统[9,10]都设计为平衡系统。因此会使用结构相同的发电机、配电线路和负荷。因此可以得到如下平衡系统：

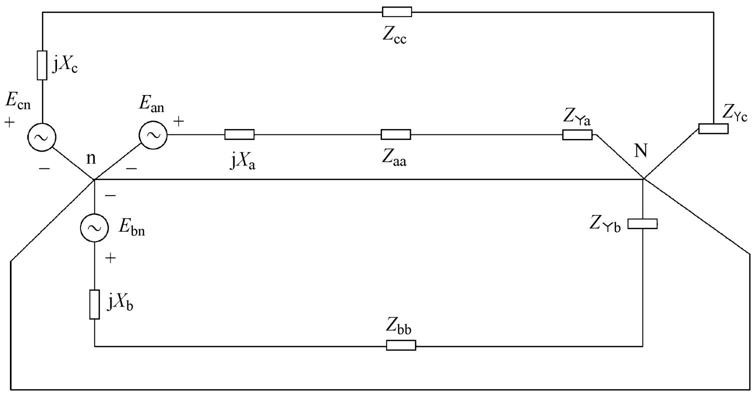


图 2-9　三相四线配电系统

$$\begin{aligned} X_a &= X_b = X_c = X_s \\ Z_{aa} &= Z_{bb} = Z_{cc} = Z_{line} \\ Z_{Ya} &= Z_{Yb} = Z_{Yc} = Z_{load} \\ S_{aa} &= S_{bb} = S_{cc} = P_L + jQ_L \end{aligned} \tag{2-14}$$

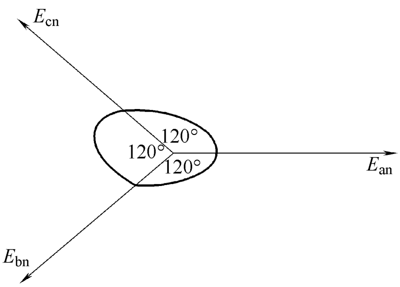


图 2-10　平衡三相系统

对于平衡发电机，

$$\begin{aligned} E_{an} &= E\angle 0° \\ E_{bn} &= E\angle -120° = E\angle 240° \\ E_{cn} &= E\angle 120° = E\angle -240° \end{aligned} \tag{2-15}$$

因此，平衡三相系统由平衡的三相发电机、输电线路和负荷组成，如图 2-11 所示。

假定负荷是纯电阻，即 $Z_Y = R_L$ 或 $S_L = P_L$，而且把输电线阻抗与发电机阻抗合到一起，即 $Z_{Line} = R_{Line} + jX_{Line} + R_{gen} + jX_{gen}$，则可以得到如下等式：

$$\begin{aligned} E_{an} &= I_a(Z_{Line} + R_L) \\ E_{bn} &= I_b(Z_{Line} + R_L) \\ E_{cn} &= I_c(Z_{Line} + R_L) \end{aligned} \tag{2-16}$$

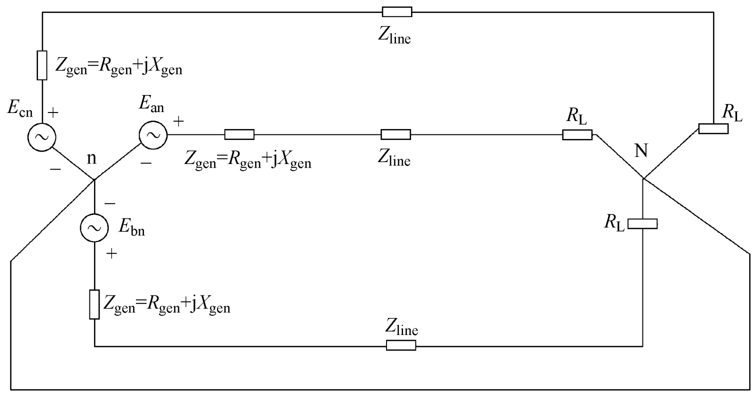


图 2-11　平衡三相系统

$$|I_a| = |I_b| = |I_c| = \frac{|E_{an}|}{|Z_{line} + R_L|} = \frac{|E_{an}|}{|Z\angle\theta|} \tag{2-17}$$

式中，

$Z = R_{Line} + jX_{Line} + R_L = R + jX = |Z|\angle\theta$;

$\theta = \arctan\frac{X}{R}$，其中 $R = R_{Line} + R_L$，$X = X_{Line}$；

$$I_a = \frac{E}{|Z|}\angle -\theta,\ I_b = \frac{E}{|Z|}\angle -120° - \theta,\ I_c = \frac{E}{|Z|}\angle 120° - \theta \tag{2-18}$$

因此，平衡三相系统的电流也是平衡的。应该指出，三相电压在一个平面上，它们的相位相互相差 120°。由此可得

$$\begin{gathered} E_{an} + E_{bn} + E_{cn} = 0;\ E\angle 0° + E\angle -120° + E\angle 120° = 0 \\ E + j0 + E(-0.5 - j0.866) + E(-0.5 + j0.866) = 0 \end{gathered} \tag{2-19}$$

类似地，三相电流也在一个平面上，它们的相位也相互相差 120°。由此可得

$$I_a + I_b + I_c = I_n \tag{2-20}$$

然而，对于平衡三相负荷，三相电流之和为零，即 $I_a + I_b + I_c = 0$，所以 $I_n = 0$。

这种情况下，中性线不承载任何电流，因此可以省掉它。图 2-12 画出的就是一个三相三线配电系统。



图 2-12　平衡三相三线配电系统

考虑图 2-13 所示的平衡三相系统。

用以下符号表示图 2-13 中的相电压和相电流：

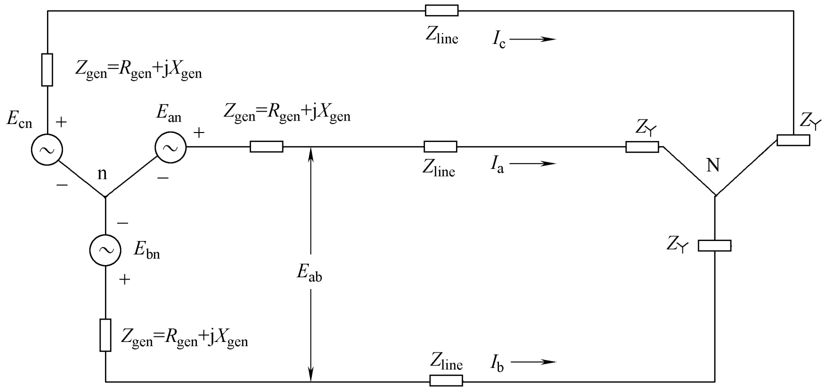


图 2-13　平衡三相系统

E_{an}，E_{bn}，E_{cn}为线对中性点电压，即相电压；

I_a，I_b，I_c为线电流或相电流。

对于图 2-14 的三相系统，对于环绕母线 a、b 和 n 的闭合路径写出基尔霍夫电压定律，有

$$E_{ab}=E_{an}-E_{bn} \tag{2-21}$$

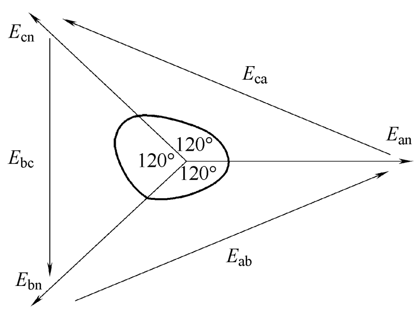


图 2-14　相电压和线间电压

因此，对于线电压可得到如下关系式：

$$E_{ab}=E\angle 0°-E\angle -120°=E-E(-1-j\sqrt{3})/2$$

$$E_{ab}=\sqrt{3}E(\sqrt{3}+j1)/2=\sqrt{3}E\angle 30° \tag{2-22}$$

$$E_{bc}=E_{bn}-E_{cn}=E\angle -120°-E\angle 120°=\sqrt{3}E\angle -90°$$

由此可得

$$E_{ab}+E_{bc}+E_{ca}=0 \tag{2-23}$$

$$E_{an}+E_{bn}+E_{cn}=0 \tag{2-24}$$

假定系统是具有平衡负荷的平衡三相系统，则

$$I_a = E_{an}/Z_Y,\ I_b = E_{bn}/Z_Y,\ I_c = E_{cn}/Z_Y \qquad (2\text{-}25)$$

因为电源电压是平衡的，负荷是平衡的，所以得到的电流也是平衡的，因此

$$I_a + I_b + I_c = 0 \qquad (2\text{-}26)$$

考虑图 2-15 所示的三角形（△）负荷。

它的相电流（△电流）如下：

$$\begin{aligned} I_{AB} &= E_{ab}/Z_\triangle \\ I_{BC} &= E_{bc}/Z_\triangle \\ I_{CA} &= E_{ca}/Z_\triangle \end{aligned} \qquad (2\text{-}27)$$

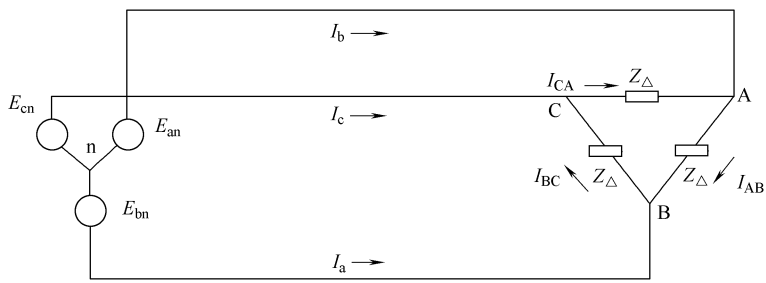


图 2-15 平衡三角形（△）负荷系统

因为电压也是平衡的，所以

$$\begin{aligned} E_{an} &= E\angle 0^\circ \\ E_{bn} &= E\angle -120^\circ \\ E_{cn} &= E\angle 120^\circ \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} E_{ab} &= \sqrt{3}E_{an}\angle 30^\circ = \sqrt{3}E\angle 30^\circ \\ E_{bc} &= \sqrt{3}E_{bn}\angle(30^\circ - 120^\circ) = \sqrt{3}E\angle -90^\circ \\ E_{ca} &= \sqrt{3}E_{cn}\angle(30^\circ + 120^\circ) = \sqrt{3}E\angle 150^\circ \end{aligned} \qquad (2\text{-}28)$$

图 2-16 所示的各相称为正序电压，即选择 a 相为基准电压，b 相落后它 120°，c 相落后它 240°。如式（2-29）所示，因为负荷是平衡的，所以相电流 I_{AB}、I_{BC}和 I_{CA}也是平衡的。

$$\begin{aligned} I_{AB} &= \sqrt{3}E\angle 30^\circ/Z_\triangle \\ I_{BC} &= \sqrt{3}E\angle -90^\circ/Z_\triangle \\ I_{CA} &= \sqrt{3}E\angle 150^\circ/Z_\triangle \end{aligned} \qquad (2\text{-}29)$$

假定图 2-15 所示系统的相关数据为

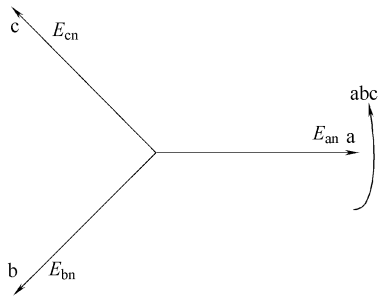


图 2-16　平衡三相系统

$$E = 10\text{V},\ Z_{\triangle} = 5\angle 30°\Omega,$$

则

$$I_{AB} = \sqrt{3}(2)\angle 0° = 3.464\angle 0°\text{A}$$

$$I_{BC} = \sqrt{3}(2)\angle -120° = 3.464\angle -120°\text{A}$$

$$I_{CA} = \sqrt{3}(2)\angle 120° = 3.464\angle 120°\text{A}$$

把基尔霍夫电流定律用于△负荷的每个节点可得到相电流如下：

$$I_a = I_{AB} - I_{CA} = 3.464\angle 0° - 3.464\angle 120° = \sqrt{3}(3.464\angle -30°)$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB} = 3.464\angle -120° - 3.464\angle 0° = \sqrt{3}(3.464\angle -150°)$$

$$I_c = I_{CA} - I_{BC} = 3.464\angle 120° - 3.464\angle -120° = \sqrt{3}(3.464\angle 90°)$$

注意，△负荷的电流 I_{AB}、I_{BC} 和 I_{CA} 是平衡的，线电流 I_a、I_b 和 I_c 也是平衡的，因此，$I_{AB} + I_{BC} + I_{CA} = 0$。而对于△联结负荷，中性点电流永远为零（$I_a + I_b + I_c = 0$）。

对于由平衡正序电源供电的平衡△负荷，存在如下关系：

$$I_a = \sqrt{3}I_{AB}\angle -30°$$

$$I_b = \sqrt{3}I_{BC}\angle -30°$$

$$I_c = \sqrt{3}I_{CA}\angle -30°$$

$$|I_{line}| = \sqrt{3}I_{\triangle}$$

线电流落后于△负荷电流 30°，如图 2-17 所示。

可以把△联结负荷转换为等效Y联结负荷，如图 2-18 所示。

如果把平衡电压施加于这两种负荷，则它们的线电流是相等的。

对于△联结负荷，存在如下关系

$$I_A = \sqrt{3}I_{AB}\angle -30° = \sqrt{3}E_{AB}\angle -30°/Z_{\triangle} \tag{2-30}$$

对于Y联结负荷，相应关系为

$$I_A = \frac{E_{AN}}{Z_Y} = \frac{E_{AB}\angle -30°}{\sqrt{3}Z_Y};\ 注：E_{AN} = \frac{E_{AB}}{\sqrt{3}} \tag{2-31}$$

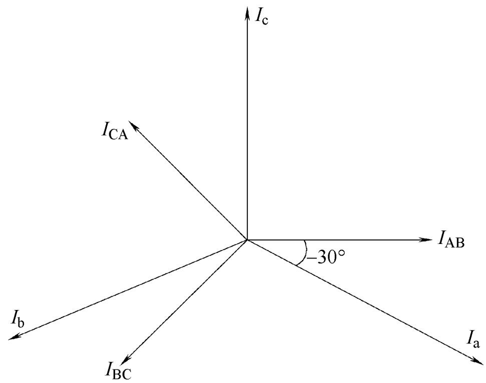


图 2-17　△联结负荷的线电流和相电流

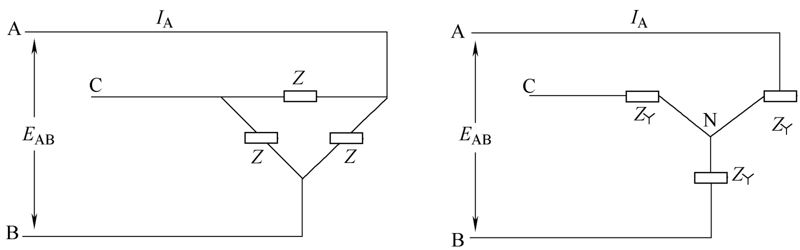


图 2-18　△联结负荷和它的等效Y联结负荷

因为$\dfrac{\sqrt{3}E_{AB}\angle -30°}{Z_{\triangle}}=\dfrac{E_{AB}\angle -30°}{\sqrt{3}Z_{Y}}$，所以

$$3Z_{Y}=Z_{\triangle}，\ Z_{Y}=Z_{\triangle}/3$$

带三相负荷的三相系统可以用单线图表示。例如，图 2-19 是一个带Y联结和△联结负荷的平衡三相系统，可以用图 2-20 的单线图表示。

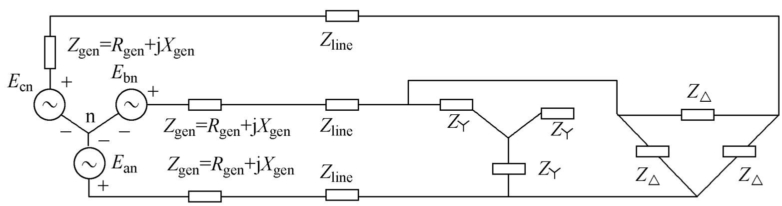


图 2-19　有两组负荷的三相系统

单线图中的电压是线间电压，功耗规定为全部三相的总功耗。单相等效电路可以用线对中性点和每相功耗表示。图 2-21 是图 2-19 和图 2-20 的单相等效电路。

如果仔细研究三相系统，我们会发现它就是 3 个单相系统。因此，三相系统可以输送 3 倍单相系统功率。

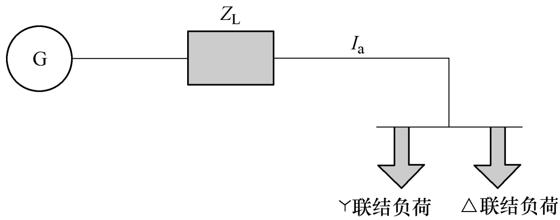


图 2-20　图 2-19 的单线图

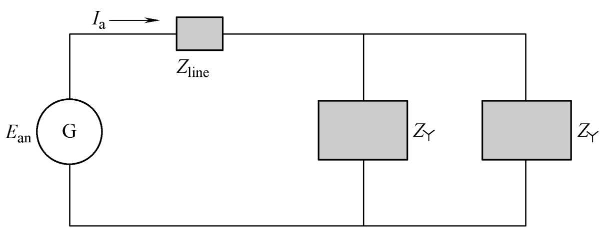


图 2-21　图 2-19 的单相等效电路

$$S_{3\phi}=3S_{\phi}=3V_{\phi}I_{\phi}^{*} \tag{2-32}$$

然而，因为相电压等于线对中性点的电压，所以线间电压为

$$V_{L-L}=\sqrt{3}V_{L-N}=\sqrt{3}V_{\phi} \tag{2-33}$$

因此，三相功率可表示为

$$S_{3\phi}=\sqrt{3}V_{L-L}I_{L}^{*}=P_{3\phi}+jQ_{3\phi} \tag{2-34}$$

对于三相Y联结系统，有如下关系

$$P_{3\phi}=\sqrt{3}V_{L-L}I_{L}\cos\theta \tag{2-35}$$

$$Q_{3\phi}=\sqrt{3}V_{L-L}I_{L}\sin\theta \tag{2-36}$$

而且复功率可写为

$$S_{3\phi}=\sqrt{(P_{3\phi}^2+Q_{3\phi}^2)} \tag{2-37}$$

$$P_{3\phi}=S_{3\phi}\cos\theta \tag{2-38}$$

$$Q_{3\phi}=S_{3\phi}\sin\theta \tag{2-39}$$

功率因数可表示为 $pf=\cos\theta$，滞后或超前　(2-40)

pf 永远需要标注出滞后还是超前。如果说 pf 是滞后的，表示负荷电流落后于电压，而负荷电压取为基准相量。功率因数也可以表示为

$$pf=\cos\theta=\frac{P}{|S|}\quad \text{超前或滞后} \tag{2-41}$$

对于滞后功率因数，无功功率 Q 为正值。因此负荷会消耗无功功率，而相位角 θ 为正。同样，对于超前功率因数，无功功率 Q 为负值。因此，负荷会发出无功功率，负荷为容性，相位角 θ 为负。以下各例需要使用复数运算。复数的代数运

算可参见附录 A。

例 2.1 考虑一个三相 480V，300kVA，$pf=0.9$ 滞后的负荷，求该负荷的有功功率、无功功率和复功率。

解

已知数据如下：

$$|S| = 300\text{kVA}$$

$$pf = \cos\theta = 0.9 \quad 滞后$$

本例中，我们选择从 S 计算 P 和 Q。

已知 $S_{3\phi}$ 和 pf；因此可计算 $P_{3\phi}$ 和 $Q_{3\phi}$ 如下：

$$P_{3\phi} = |S_{3\phi}|\cos\theta = 300 \times 0.9\text{kW} = 270\text{kW}$$

$$Q_{3\phi} = |S_{3\phi}|\sin\theta = 300 \times 0.4359\text{kvar} = 130.77\text{kvar}$$

因为 pf 是滞后的，所以 $Q>0$。

$$S = 270 + \text{j}130.77 = 300\angle\arccos(0.9)\text{kVA}$$

例 2.2 考虑一个三相 480V，240kW，$pf=0.8$ 滞后的负荷，求该负荷的有功功率、无功功率和复功率。

解

已知数据如下：

$$P = 240\text{kW}$$

$$pf = \cos\theta = 0.8 \text{ 滞后}$$

可以从 P 计算 S 和 Q。

$$|S| = P/\cos\theta = 240/0.8\text{kVA} = 300\text{kVA}$$

$$Q_{3\phi} = |S_{3\phi}|\sin\theta = 300 \times 0.6\text{kvar} = 180\text{kvar}$$

因为 pf 是滞后的，所以 $Q>0$。

$$S = 270 + \text{j}180 = 300\angle\arccos(0.8)\text{kVA}$$

例 2.3 考虑一个三相 480V，180kVA，$pf=0.0$ 超前的负荷，求该负荷的有功功率、无功功率和复功率。

解

已知数据如下：

$$|S| = 180\text{kVA}$$

$$pf = \cos\theta = 0.0 \text{ 超前}$$

可以从 S 计算 P 和 Q。可计算 $P_{3\phi}$ 和 $Q_{3\phi}$ 如下：

$$P_{3\phi} = |S_{3\phi}|\cos\theta = 180 \times 0.0 = 0$$

$$Q_{3\phi} = |S_{3\phi}|\sin\theta = 180 \times (-1)\text{kvar} = -180\text{kvar}$$

因为 pf 是超前的，所以 $Q<0$。

$$S = 0 - \text{j}180 = 180\angle -90^\circ\text{kvar}$$

2.4　负荷模型

感性负荷可以用它的阻抗表示，如图2-22所示。

阻抗 Z_L 是感性负荷。电力系统多数负荷都是感性的。大部分工业、商业和住宅用电动机都是感应电机。图2-22中，负荷电压 V_L 是线对中性点电压，而 I_L 是加到负荷上的相电流。

$$\begin{gathered}Z_L = R_L + j\omega L = R + jX_L = |Z_L|\angle\theta \\ |Z_L| = \sqrt{R^2 + X_L^2},\ \theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)\end{gathered} \tag{2-42}$$

感性负荷的功率用该负荷消耗的有功功率和无功功率表示。

$$I_L = \frac{V_L\angle 0°}{Z_L\angle\theta} = I_L\angle -\theta,\ I_L = \frac{|V_L|}{|Z_L|}\angle -\theta \tag{2-43}$$

以负荷电压为基准相量（即 $V_L = |V_L|\angle 0$），负荷电流落后于电压，如图2-23所示。

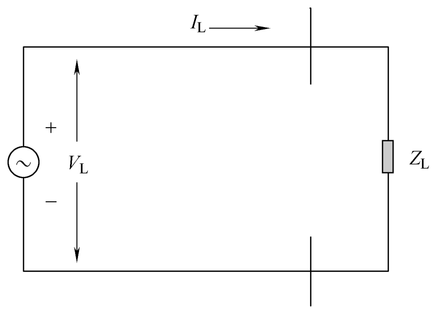


图2-22　负荷的感性阻抗模型

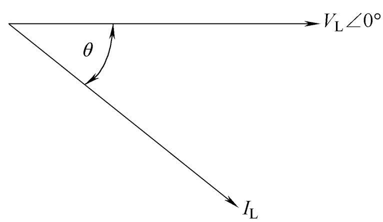


图2-23　图2-22的感性负荷的电压及其滞后的电流

负荷吸收的复功率可表示为

$$\begin{gathered}S_L = V_L I_L^* = V_L(I_L\angle -\theta)^* = |V_L||I_L|\cos\theta + j|V_L||I_L|\sin\theta \\ S_L = |V_L||I_L|(\mathrm{VA}) \\ P = |V_L||I_L|\cos\theta(\mathrm{W}) \\ Q = |V_L||I_L|\sin\theta(\mathrm{var})\end{gathered} \tag{2-44}$$

复功率可表示为

$$S = P + jQ$$

式中，$\theta = \arctan\dfrac{Q}{P}$，$pf = \cos\theta$ 滞后。

感性负荷模型的功率表示如图2-24所示。

图2-24显示了感性负荷消耗的有功功率和无功功率。

图 2-25 是容性阻抗负荷模型。它的负荷电压也是线对中性点电压及基准相量。负荷电流是施加于负荷的相电流。

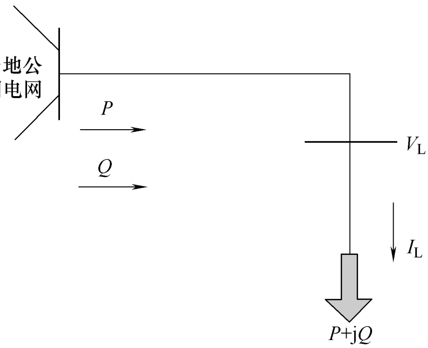


图 2-24　感性负荷的功率表示

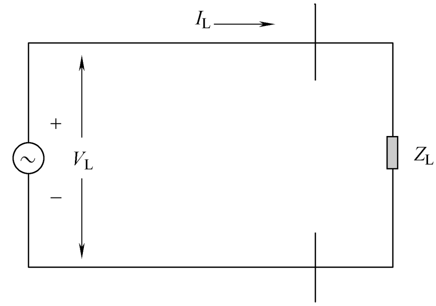


图 2-25　容性阻抗负荷模型

$$
\begin{gathered}
Z_L = R - jX_C = |Z_L| \angle -\theta \\
|Z_L| = \sqrt{R^2 + X_C^2},\ \theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) \\
I_L = \frac{V_L \angle 0^\circ}{Z_L \angle -\theta} = I_L \angle \theta,\ |I_L| = \frac{|V_L|}{|Z_L|} \angle \theta
\end{gathered}
\tag{2-45}
$$

负荷电压是基准相量（即 $V_L = |V_L| \angle 0$），负荷电流超前于电压，如图 2-26 所示。

负荷吸收的复功率为

$$
\begin{gathered}
S_L = V_L I_L^* = V_L (I_L \angle \theta)^* = V_L I_L \angle -\theta = |V_L||I_L|\cos\theta - j|V_L||I_L|\sin\theta \\
S = P - jQ,\ \theta = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) \quad \text{功率因数 } pf = \cos\theta, \text{超前}
\end{gathered}
\tag{2-46}
$$

因此负荷模型可表示如图 2-27 所示。

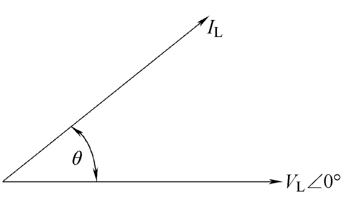


图 2-26　容性负荷的电压和电流

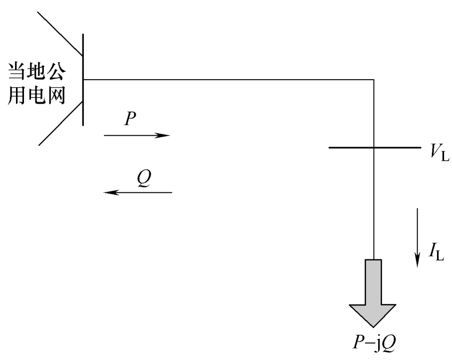


图 2-27　容性负荷的功率模型

因此，负荷会消耗有功功率，而容性负荷会向当地电网提供无功功率。如今，越来越多的变速驱动系统由控制多种电动机的大功率变换器控制。此外，越来越多的电力电子负荷渗入电力系统。这些种类的负荷是非线性负荷，在它们的暂态和稳态运行期间，既可能是感性负荷，也可能是容性负荷。功率因数修正、电压控制和稳定都是研究很活跃的领域。

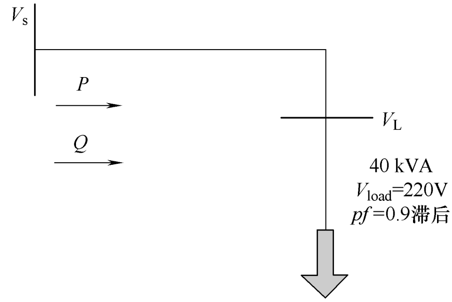


图 2-28　例 2.4 的功率模型

例 2.4　对于图 2-28 给出的单相感性负荷，计算它的线电流。

解

$$kVA = |V||I_L| \times 10^3$$

$$|I_L| = 40 \times 10^3 / 220 = 181.8$$

$$I_L = 181.8\angle -25.8°\text{A}$$

例 2.5　对于图 2-29 给出的三相感性负荷，计算它的线电流。

解

$$kVA_{3\phi} = 2000 \quad V_{L-L} = 20\text{kV}$$

$$kVA = \sqrt{3}V_{L-L}I_L$$

$$|I_L| = 2000/\sqrt{3} \times 20\text{A} = 57.8\text{A} \quad I_L = 57.8\angle -25.8°$$

$$P_{3\phi} = kW = kVA\cos\theta = 2000 \times 0.9\text{kW} = 1800\text{kW}$$

$$Q_{3\phi} = kvar = kVA\sin\theta = 2000 \times \sin(25.8°)\text{kvar} = 870.46\text{kvar}$$

例 2.6　考虑图 2-30 运行于滞后功率因数的发电机。计算系统提供的有功功率和无功功率。

解

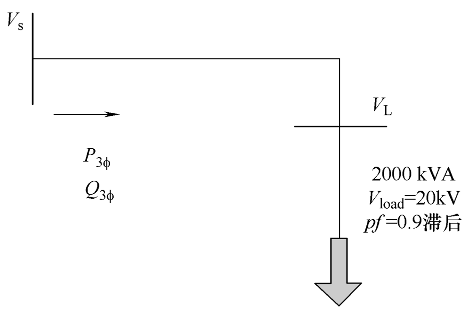


图 2-29　例 2.5 的功率模型



图 2-30　以滞后功率因数运行的发电机

图 2-31 是图 2-30 的等效电路模型；图 2-32 表示了发电机的电压和电流。

$$S_{3\phi} = 3V_G I_G^* = P_{G3\phi} + jQ_{G3\phi}$$

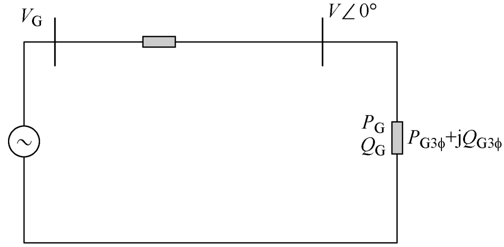


图 2-31 例 2.6 的等效电路

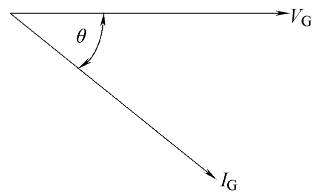


图2-32 V_G 和 I_G 的相量关系

2.5 电网中的变压器

现在人们已经了解了两个事实。传输功率是电压和电流的乘积。输电线损耗是流经线路的电流的二次方与线路电阻的乘积。因此，以低电压传送大功率会产生非常大的功率损耗。对于大功率输电，需要提高电压降低电流。这个问题由于变压器的发明得到了解决。

2.5.1 变压器简史

在 19 世纪 80 年代发生的“电流大战”[3] 中，乔治·威斯汀豪斯（George Westinghouse）（1864—1914）[1] 和托马斯·爱迪生（Thomas Edison）在电力配送中使用直流（爱迪生的偏好）还是使用交流（威斯汀豪斯的主张）的问题上发生了争执。Tesla 也选择使用交流[3]。因为爱迪生的设计是基于低压直流的，所以配电网络中的功率损耗非常高。法国的 Lucien Gaulard 和英格兰的 John Gibbs[1] 1881 年在伦敦展示了第一台交流电力变压器[1]。这一发明引起了威斯汀豪斯的兴趣。然后他在设计匹兹堡（Pittsburgh）的一个交流网络时使用了 Gaulard-Gibbs 变压器和西门子公司的交流发电机。威斯汀豪斯理解变压器对于交流输电来说是至关重要的，因为它可以保证功率损耗可以为人们接受。提高电压、降低电流可以减少输电功率损耗。最终，威斯汀豪斯确认，交流功率对于大功率输电来说更加经济，并开办了威斯汀豪斯（西屋）公司来制造交流电力设备。

2.5.2 输电电压

在 19 世纪 90 年代早期，输电电压还只有约 3.3kV。到 20 世纪 70 年代，大功率输电电压已经高达 765kV 等级。二次配电系统的标准运行电压是低电压，范围从单相的 120 ~240V 到三相的 208 ~600V。一次配电电压范围为 2.4 ~20kV。次输电电压范围为 23 ~69kV。高压输电的电压范围为 115 ~765kV。发电电压范围为 3.2 ~22kV。发电电压被升至高压用于大功率输电，然后，当系统接近大城市区域的负荷中心时，电压被降至次输电电压。配电电压被用于城市内部的电力配送。住宅、商业和工业负荷的供电电压等级为 120 ~600V[9,10]。

图 2-33 是 PV 电源向当地分布式发电系统馈电的典型情况。PV 板的作用如同

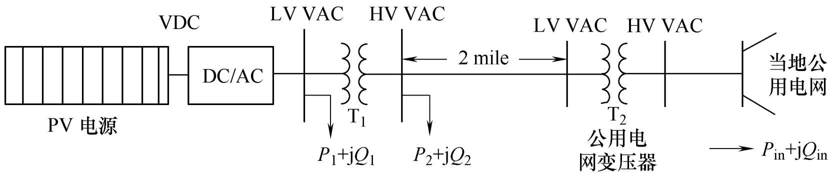


图 2-33　PV 电源向辐射状配电系统馈电

蓄电池，是直流电源。它们可以串、并联。它的最大直流运行电压是 600V。对于目前的直流配送技术来说，配送数千千瓦功率的代价非常高昂。如果以低电压配送 PV 系统等可再生能源的大功率，配电线路上产生的功率损耗会非常高。可以使用 DC/DC 变换器（即升压变换器）提高电压。然而配套的 DC/DC 变换器和直流系统保护的成本非常高。在图 2-33 所示的系统设计中，直流功率被 DC/AC 逆变器转换为交流。下一章将研究大功率变换器定容及 PV 系统设计。

图 2-33 中，PV 电源的功率范围为 3 ~ 5kVA；它连到 120V 住宅系统中向住宅负荷供电。在把过剩功率回送到当地电网之前要先把它升压。

2.5.3　变压器

变压器是一个通过感性耦合绕组把电功率从一个电压等级变换到另一个电压等级的电网元件。单相变压器的每个绕组都缠绕在一个铁心上。两个绕组使用同一铁心结构被磁耦合在一起。理想变压器的输入功率与输出功率相等。这意味着输入电流乘以输入电压等于输出电流与输出电压之积。其中一个绕组用交流电源励磁。根据法拉第感应定律[8-13]，时变磁场会在第二个绕组感应出电压。

一台变压器中，二次绕组的每匝电压与一次绕组相同。可以通过选择匝数比来升高电压或降低电压。对于高压输电，需要使用变压器提高电压，从而降低电流来减少输电线功率损耗。图 2-34 画出的是理想变压器。理想变压器是假定其铁心和绕组的功率损耗为零。

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \qquad \text{安匝} \tag{2-47}$$

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \qquad \text{V/匝} \tag{2-48}$$

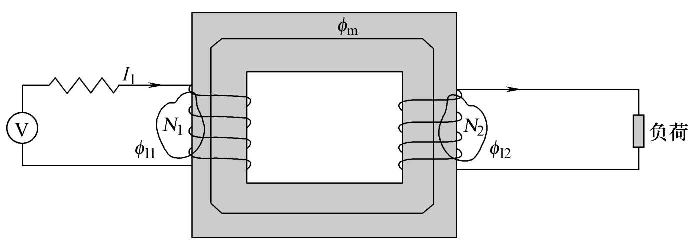


图 2-34　单相理想变压器

图 2-34 中，ϕ_m 表示互磁链，而 ϕ_{l1} 和 ϕ_{l2} 分别表示变压器两侧的漏磁链。互磁链会产生互感，而漏磁链会产生漏感。

图 2-35 是理想变压器的示意图。因为理想变压器的损耗假定为零，所以输入功率与输出功率相等。

$$S_1 = V_1 I_1^* = S_2 = V_2 I_2^* \tag{2-49}$$

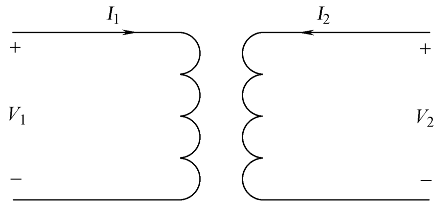


图 2-35　理想变压器示意图

实际变压器既有铁心损耗也有绕组损耗，如图 2-36 所示。这些损耗分别用 R_1 和 R_2 表示。这种表示法中，R_1 代表一次侧的阻性损耗，R_2 代表二次侧的阻性损耗。

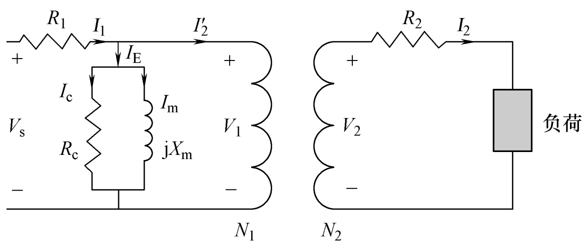


图 2-36　实际变压器的示意图

习惯上把变压器接到电源的一侧称为一次侧，把接到负荷的一侧称为二次侧。为简单起见，我们将按编号或电压等级称呼变压器的每一侧，即变压器的一侧为高压侧，而另一侧为低压侧。

$$\begin{aligned} I_E &= I_m + I_C \\ X_m &= \omega L_m \end{aligned} \tag{2-50}$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \tag{2-51}$$

电流 I_E 称为励磁电流。它有两个分量 I_m 和 I_c。电流 I_m 称为磁化电流，而 I_c 称为铁心电流。式（2-50）中，L_m 表示磁化电感。该电感可从互感和每个线圈的自感计算。

$$\begin{aligned} V_s &= V_m \cos\omega t \\ \overline{V}_s &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle 0° \end{aligned} \tag{2-52}$$

$$I_m = \frac{V_s \angle 0°}{jX_m} = \frac{V_s}{X_m} \angle -90° \tag{2-53}$$

在交流配电电路中，电源电压可用式（2-52）表示。磁化电流可通过式（2-53）算得。图 2-37 是完整的变压器模型。该模型显示了变压器的一次侧电阻和漏抗以及二次侧的漏抗和绕组电阻。铁心损耗和磁化电抗分别用 R_c 和 X_m 表示，放在一次侧。

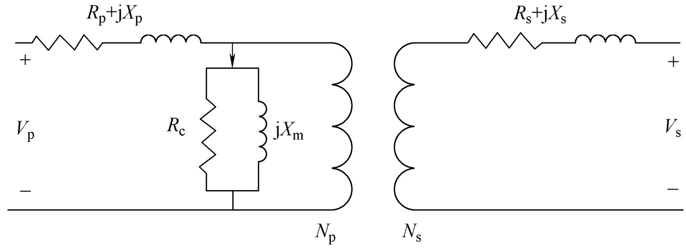


图 2-37　实际变压器的完整示意图

$$X_p = \omega_e L_{lp}, X_s = \omega_e L_{ls}, X_m = \omega_e L_m$$

式中，L_{lp}、L_{ls} 和 L_m 分别代表变压器一次绕组漏感、二次绕组漏感和互感。因为变压器设计的励磁电流很小——为负荷电流的 2% ~5%，所以变压器的并联磁化元件可视为非常大的阻抗；在变压器的电压计算中可以把它们省掉。图 2-38 是电压分析中使用的变压器模型。

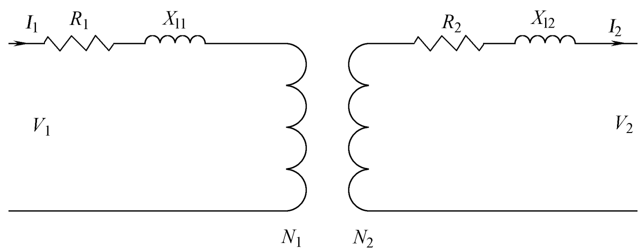


图 2-38　电压分析中使用的变压器等效模型

图 2-38 中，电阻 R_1 代表 1 号绕组的电阻，X_{l1} 代表同一绕组的漏抗。同样，R_2 和 X_{l2} 代表 2 号绕组的电阻和漏抗。在这种表示法中，为保持通用性，不使用一次绕组和二次绕组的叫法，每侧都可以接到负荷或电源。

图 2-39 是与图 2-38 等效的变压器模型。其中两绕组的阻抗都折算到 1 号侧。假定 1 号侧是高压侧，2 号侧是低压侧。然后图 2-39 可重新标记如下。

上述等效电路模型可用以下公式描述。

$$\frac{V_{HV}}{N_{HV}} = \frac{V_{LV}}{N_{LV}} \qquad \text{V/匝} \tag{2-54}$$

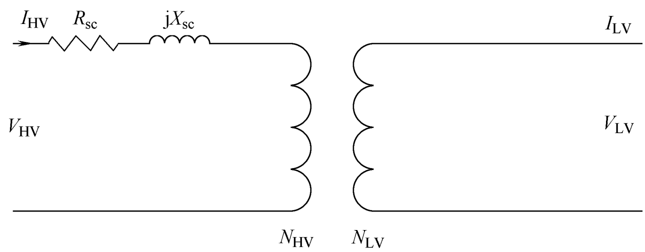


图 2-39　变压器等效模型

$$N_{HV}I_{HV} = N_{LV}I_{LV} \qquad \text{安匝} \tag{2-55}$$

图 2-39 中的 R_{sc}和 X_{sc}分别为变压器的短路电阻和短路电抗。这两项可以从变压器短路试验求得。短路试验是把变压器的一侧短路，施加一个额定电压 5% ~ 10% 的电压，再测量短路电流。施加电压可以调节，使测得的短路电流等于负荷的额定电流。短路试验可视为一项负荷试验，因为它反映了额定负荷条件。

$$Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} \tag{2-56}$$

$$R_{sc} = R_1 + a^2 R_2 \tag{2-57}$$

$$X_{sc} = X_{l1} + a^2 X_{l2} \tag{2-58}$$

式中，$a = \dfrac{V_{HV}}{V_{LV}} = \dfrac{N_{HV}}{N_{LV}}$。

2.6　微电网系统建模

作为本章目标的一部分，我们将开发微电网系统的模型表示（见图 2-40）。

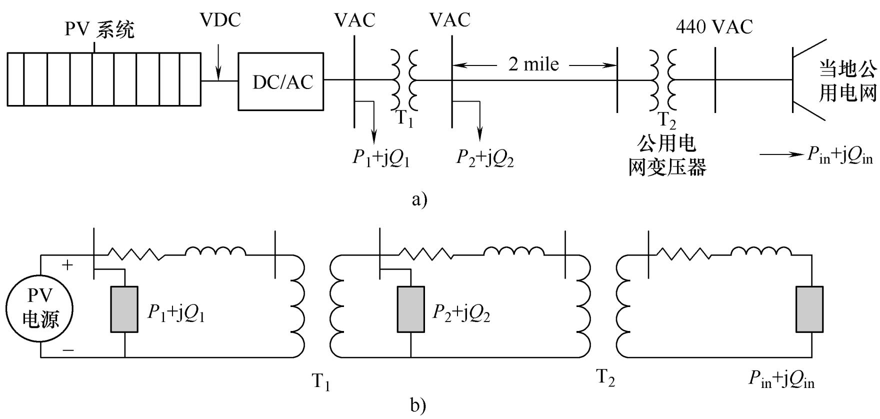


图　2-40

a）辐射状配电馈线单线图　b）辐射状微电网配电馈线阻抗模型图

图2-40b中，PV系统加DC/AC逆变器用PV电源表示。本节后面将讨论PV系统的建模。

用图2-40b的模型计算负荷电压需要进行一系列计算，因为涉及的变压器很多，而且需要注意要分析的是变压器的哪一侧。首先需要从上述模型中消去变压器。要做到这一点，需要把系统基于相同的电压基值和电流基值归一化。为理解这一归一法，先要介绍标幺值系统。

2.6.1 标幺值系统

在介绍标幺值系统（pu）的概念之前，先要引进额定值或标称值的概念[9,10]。要理解额定值，可以以一个50W灯泡为例。灯泡的功率和电压额定值如图2-41那样印在灯泡上。

灯泡厂家告诉我们，如果在灯泡上施加120V电压，它消耗的功率为50W。根据以上数值，可以计算灯泡的阻抗。

$$R_{灯泡}=\frac{V^2}{P}=\frac{(120\text{V})^2}{50\text{W}}=\frac{14400\text{V}^2}{50\text{W}}=288\Omega$$

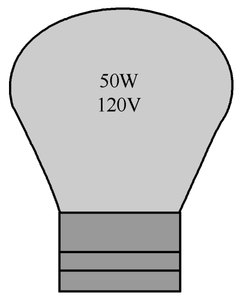


图2-41 一个灯泡的额定值

我们还可以知道，如果给灯泡加额定电压4倍的480V电压，灯丝会更亮，但灯泡可能会爆炸。因此，额定值也告诉我们电器安全运行的条件。

设置以下数值㊀：

$$P_{\text{base}}=50\text{W}=P_{\text{rated}}$$
$$V_{\text{base}}=120\text{V}=V_{\text{rated}}$$

使用这些值对灯泡的运行条件进行归一化：

$$P_{\text{pu}}=\frac{P_{\text{actual}}}{P_{\text{base}}} \tag{2-59}$$

$$V_{\text{pu}}=\frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{base}}} \tag{2-60}$$

因此对于此灯泡，有

$$P_{\text{pu}}=\frac{50}{50}=1.0\text{pu}$$

$$V_{\text{pu}}=\frac{120}{120}=1.0\text{pu}$$

因此，1pu表示满负荷或额定负荷。假如灯泡的施加电压为480V，则

$$V_{\text{pu}}=\frac{480}{120}=4.0\text{pu}$$

㊀ 译者注：以下各式中，下标base代表基值，rated代表额定值，actual代表实际值。

负荷上施加电压的标幺值为 4pu，即额定电压的 4 倍。

如果说负荷的负载为一半，则它的负荷标幺值为 0.5pu。如果说负荷电压高于额定电压 10%，则意味着电压为 1.10pu。

在标幺值系统中，电压、电流、功率、阻抗和其他电气量都表示为相对于它的基值的标幺值，即

$$\text{标幺值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}} \tag{2-61}$$

习惯上，选择两个基本量来定义一个标幺值系统。通常选择电压和功率作为基本量。

假定

$$V_b = V_{rated} \tag{2-62}$$

$$S_b = S_{rated} \tag{2-63}$$

然后计算电流和阻抗的基值：

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \tag{2-64}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b^2}{S_b} \tag{2-65}$$

标幺值为

$$V_{pu} = \frac{V_{actual}}{V_b} \tag{2-66}$$

$$I_{pu} = \frac{I_{actual}}{I_b} \tag{2-67}$$

$$S_{pu} = \frac{S_{actual}}{S_b} \tag{2-68}$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_b} \tag{2-69}$$

$$Z\% = Z_{pu} \times 100\% \quad \text{基值 Z 的百分数} \tag{2-70}$$

例 2.7　一个灯泡的额定值为 120V，500W。计算灯泡的阻抗标幺值和百分数，并画出等效电路。

解

根据额定功率和额定电压，可算得灯泡的电阻为

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V^2}{P} = \frac{(120\text{V})^2}{500\text{W}} = 28.8\Omega$$

$$pf = 1.0 \quad Z = 28.8\angle 0°\Omega$$

选择基值为

$$S_b = 500\text{VA}$$

$$V_b = 120\text{V}$$

算得阻抗基值为

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(120\text{V})^2}{500\text{W}} = 28.8\Omega$$

阻抗标幺值为

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{28.8\angle 0°}{28.8} = 1\angle 0°\text{pu}$$

百分数阻抗为

$$Z\% = 100\%$$

标幺值等效电路如图 2-42 所示。

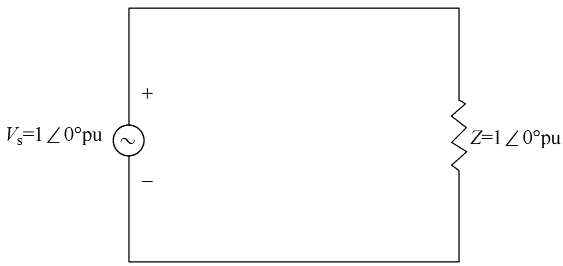


图 2-42　例 2.7 的等效电路

例 2.8　一个灯泡的额定值为 120V，500W。如果施加在灯泡上的电压是额定值的 2 倍，计算通过灯泡的电流。使用标幺值法。

解

$$V_b = 120\text{V}$$

$$V_{pu} = \frac{V}{V_b} = \frac{240\angle 0°}{120} = 2\angle 0°\text{pu}$$

$$Z_{pu} = 1\angle 0°\text{pu}$$

标幺值等效电路如下（见图 2-43）：

$$I_{pu} = \frac{V_{pu}}{Z_{pu}} = \frac{2\angle 0°}{1\angle 0°} = 2\angle 0°\text{pu}$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} = \frac{500}{120}\text{A} = 4.167\text{A}$$

$$I_{actual} = I_{pu}.\ I_b = 2\angle 0° \times 4.167\text{A} = 8.334\angle 0°\text{A}$$

单相电路的标幺值系统为

$$S_b = S_{1-\phi} = V_\phi I_\phi \tag{2-71}$$

式中，

$$V_\phi = V_{\text{线对中性点}} \tag{2-72}$$

$$I_\phi = I_{\text{线电流}} \tag{2-73}$$

对于变压器，选择的基值为

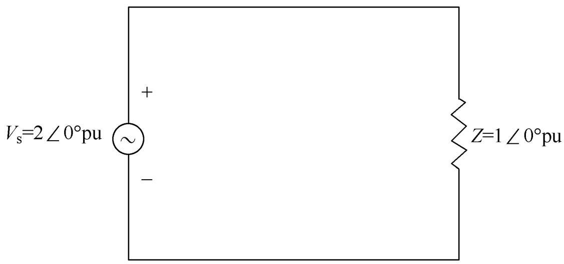


图 2-43 例 2.8 的标幺值等效电路

$$V_{bLV} = V_{\phi LV} \quad V_{bHV} = V_{\phi HV} \tag{2-74}$$

$$I_{bLV} = \frac{S_b}{V_{bLV}} \quad I_{bHV} = \frac{S_b}{V_{bHV}} \tag{2-75}$$

变压器两侧的阻抗基值分别为

$$Z_{bLV} = \frac{V_{bLV}}{I_{bLV}} = \frac{(V_{bLV})^2}{S_b} \tag{2-76}$$

$$Z_{bHV} = \frac{V_{bHV}}{I_{bHV}} = \frac{(V_{bHV})^2}{S_b} \tag{2-77}$$

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b} = V_{pu} I_{pu}^* \tag{2-78}$$

$$P_{pu} = \frac{P}{S_b} = V_{pu} I_{pu} \cos\theta \tag{2-79}$$

$$Q_{pu} = \frac{Q}{S_b} = V_{pu} I_{pu} \sin\theta \tag{2-80}$$

如果变压器数量为两个或更多，则需要把阻抗模型归一化到同一基值。可以进行如下选择：

选择 1

$$S_{b1} = S_A \quad V_{b1} = V_A$$

于是

$$Z_{b1} = \frac{V_{b1}^2}{S_{b1}} \quad Z_{pu1} = \frac{Z_L}{Z_{b1}}$$

选择 2

$$S_{b2} = S_B \quad V_{b2} = V_B$$

于是

$$Z_{b2} = \frac{V_{b2}^2}{S_{b2}}, \; Z_{pu2} = \frac{Z_L}{Z_{b2}}$$

$$\frac{Z_{pu2}}{Z_{pu1}} = \frac{Z_L}{Z_{b2}} \times \frac{Z_{b1}}{Z_L} = \frac{Z_{b1}}{Z_{b2}} = \frac{V_{b1}^2}{S_{b1}} \times \frac{S_{b2}}{V_{b2}^2} \tag{2-81}$$

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}}\right)^2 \times \left(\frac{S_{b2}}{S_{b1}}\right)$$

一般把作为标称值（额定值）给出的值称为“原（old）”值，而作为共用基值选择的值称为“新（new）”值。使用这种表示法，原基值与新基值之间的变换可表示为

$$Z_{\mathrm{pu,\ new}}=Z_{\mathrm{pu,\ old}}\left(\frac{V_{\mathrm{b,\ old}}}{V_{\mathrm{b,\ new}}}\right)^{2}\times\left(\frac{S_{\mathrm{b,\ new}}}{S_{\mathrm{b,\ old}}}\right)\tag{2-82}$$

可以使用标幺值概念定义变压器的标幺值模型。考虑下面图 2-44 显示的分别折算到低压侧和高压侧的变压器模型等效电路。

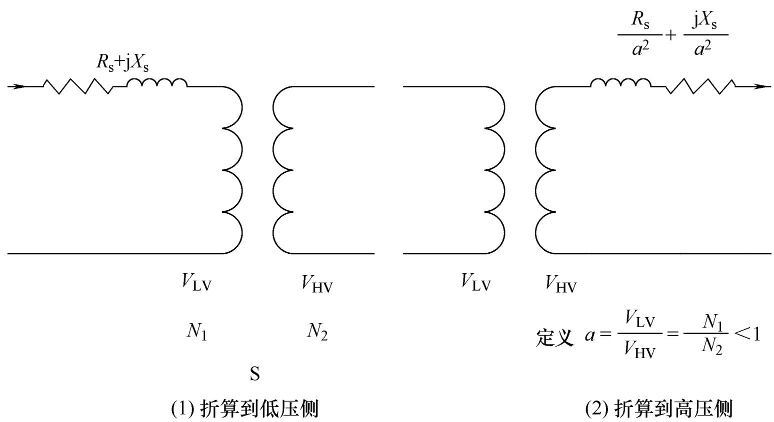


图 2-44　单相变压器的等效电路

变压器的基值选择如下：

$$V_{\mathrm{b1}}=V_{\mathrm{LV,\ rated}}\tag{2-83}$$

$$S_{\mathrm{b}}=S_{\mathrm{rated}}\tag{2-84}$$

于是可以计算新的共用基值下的电压基值。

$$V_{\mathrm{b2}}=\frac{V_{\mathrm{HV}}}{V_{\mathrm{LV}}}V_{\mathrm{b1}}=\frac{1}{a}V_{\mathrm{b1}}$$

$$Z_{\mathrm{b1}}=\frac{V_{\mathrm{b1}}^{2}}{S_{\mathrm{b}}}\qquad Z_{\mathrm{b2}}=\frac{V_{\mathrm{b2}}^{2}}{S_{\mathrm{b}}}$$

$$\frac{Z_{\mathrm{b1}}}{Z_{\mathrm{b2}}}=\frac{V_{\mathrm{b1}}^{2}}{V_{\mathrm{b2}}^{2}}=\frac{V_{\mathrm{b1}}^{2}}{\left(\frac{1}{a}V_{\mathrm{b1}}\right)^{2}}=a^{2}$$

标幺值阻抗为

$$Z_{\mathrm{pu1}}=\frac{R_{\mathrm{s}}+\mathrm{j}X_{\mathrm{s}}}{Z_{\mathrm{b1}}}$$

$$Z_{\mathrm{pu2}}=\frac{\frac{R_{\mathrm{s}}}{a^{2}}+\mathrm{j}\frac{X_{\mathrm{s}}}{a^{2}}}{Z_{\mathrm{b2}}}=\frac{\frac{R_{\mathrm{s}}}{a^{2}}+\mathrm{j}\frac{X_{\mathrm{s}}}{a^{2}}}{\frac{Z_{\mathrm{b1}}}{a^{2}}}=\frac{R_{\mathrm{s}}+\mathrm{j}X_{\mathrm{s}}}{Z_{\mathrm{b1}}}$$

根据以上关系，可以看出，变压器的标幺值阻抗是相同的，即

$$Z_{pu1} = Z_{pu2}$$

变压器的每相等效电路如图 2-45 所示。其中 R_s 和 X_s 代表折算到低压侧的变压器参数。$a = \frac{V_{LV}}{V_{HV}} = \frac{N_1}{N_2} < 1$。

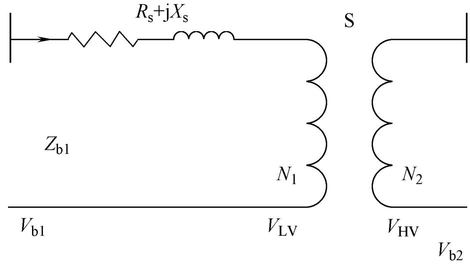


图 2-45　变压器的等效电路

变压器的标幺值等效电路如图 2-46 所示。

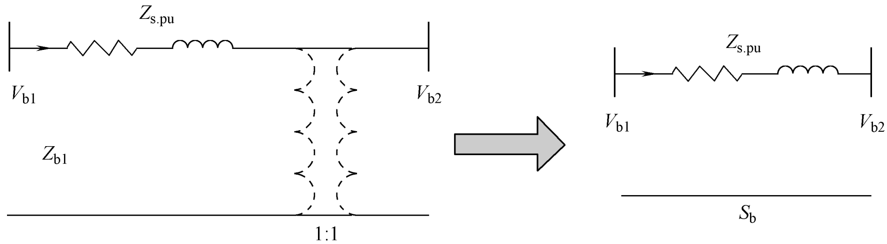


图 2-46　图 2-45 的标幺值等效电路

例 2.9　一台单相变压器的额定参数为 200kVA，200/400V，短路电抗为 10%。计算功率因数为 1 且额定电压为 400V 情况下变压器满负荷的电压变化。

解

令

$$V_{b2} = 400\text{V}$$
$$S_b = 200\text{kVA}$$

于是，

$$S_{负荷,\ pu} = 1\angle 0°\text{pu}$$
$$X_{s,\ pu} = \text{j}0.1\text{pu}$$

标幺值等效模型如图 2-47 所示。

额定电压为

$$V_{负荷,\ pu} = 1\angle 0°\text{pu}$$

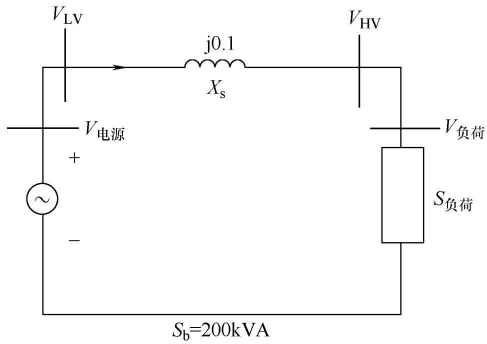


图 2-47　例 2.9 的标幺值等效电路

$$I_{负荷,pu}=\left(\frac{S_{负荷,pu}}{V_{负荷,pu}}\right)=\left(\frac{1\angle 0°}{1\angle 0°}\right)=1\angle 0°\text{pu}$$

$$\begin{aligned}V_{电源,pu}&=V_{负荷,pu}+I_{pu}X_{s,pu}\\&=1.0\angle 0°+1.0\angle 0°\times \text{j}0.1\\&=1+\text{j}0.1=1.001\angle 5.7°\text{pu}\end{aligned}$$

满载下的标幺值负荷电压为

$$V_{pu,满载}=V_{负荷,pu}=1\angle 0°\text{pu}$$

当切断负荷（空载）并设置电源电压为 1.001∠5.7°pu 时，空载电压为

$$V_{pu,空载}=V_{P,pu}=1.001\angle 5.7°\text{pu}$$

因此，根据定义，电压变化（Voltage Regulation，VR）为

$$VR=\frac{|V_{pu,空载}|-|V_{pu,满载}|}{|V_{pu,满载}|}\times 100\%$$

计算得

$$VR=\frac{1.001-1.0}{1.0}\times 100\%=0.1\%$$

下面将标幺值系统的概念扩展至三相系统。这一扩展非常简单。可以把三相系统视为连接为三相系统的 3 个单相电路。

对于三相系统，按与前面相同的方法选择 S_b 和 V_b，但功率基值代表三相功率，而电压基值等于线间电压，即

$$S_b=S_{三相}=3S_{一相}\tag{2-85}$$

$$S_b=3V_\phi I_\phi\tag{2-86}$$

式中，相电压为

$$V_\phi=V_{线对中性点}=\frac{V_{L(线电压)}}{\sqrt{3}}\tag{2-87}$$

因此，

$$V_{\phi}=\frac{V_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}}\quad 且\quad I_{\phi}=I_{线电流}=I_{\mathrm{L}} \tag{2-88}$$

由式（2-86）和式（2-88）可得

$$S_{\mathrm{b}}=3\frac{V_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}}I_{\mathrm{L}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{L}} \tag{2-89}$$

对于三相变压器，高压（HV）侧和低压（LV）侧的电压基值选择为

$$V_{\mathrm{bLV}}=V_{\mathrm{L(LV)}}\quad V_{\mathrm{bHV}}=V_{\mathrm{L(HV)}} \tag{2-90}$$

因此，三相系统的功率基值可表示为

$$S_{\mathrm{b}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{b(LV)}}I_{\mathrm{b(LV)}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{b(HV)}}I_{\mathrm{b(HV)}} \tag{2-91}$$

低压（LV）侧和高压（HV）侧的电流基值分别为

$$I_{\mathrm{bLV}}=\frac{S_{\mathrm{b}}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{b(LV)}}}\quad I_{\mathrm{bHV}}=\frac{S_{\mathrm{b}}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{b(HV)}}} \tag{2-92}$$

用与前面相同的方法定义三相系统每相的 Z_{b}。因此，

$$Z_{\mathrm{bLV}}=\frac{V_{\phi\mathrm{LV}}}{I_{\phi\mathrm{LV}}} \tag{2-93}$$

且

$$V_{\phi\mathrm{LV}}=\frac{V_{\mathrm{bLV}}}{\sqrt{3}}\quad I_{\mathrm{bLV}}=\frac{S_{\mathrm{b}}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{b(LV)}}}$$

由以上各式可得

$$Z_{\mathrm{bLV}}=\frac{V_{\mathrm{bLV}}}{\sqrt{3}}\times\frac{\sqrt{3}V_{\mathrm{bLV}}}{S_{\mathrm{b}}}$$

最后，

$$Z_{\mathrm{bLV}}=\frac{(V_{\mathrm{bLV}})^2}{S_{\mathrm{b}}} \tag{2-94}$$

$$Z_{\mathrm{bHV}}=\frac{(V_{\mathrm{bHV}})^2}{S_{\mathrm{b}}} \tag{2-95}$$

功率的标幺值定义为三相系统功率除以 S_{b}，即

$$S_{\mathrm{pu}}=\frac{S_{3\phi}}{S_{\mathrm{b}}}=\frac{\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{L}}^{*}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{b}}I_{\mathrm{b}}}=V_{\mathrm{pu}}I_{\mathrm{pu}}^{*} \tag{2-96}$$

再重申，阻抗基值为

$$Z_{\mathrm{b}}=\frac{V_{\mathrm{b}\phi}}{I_{\mathrm{b}\phi}}=\frac{V_{\mathrm{b}\phi}^2}{S_{\mathrm{b}\phi}}=\frac{3V_{\mathrm{b}\phi}^2}{3S_{\mathrm{b}\phi}}=\frac{3V_{\mathrm{b}\phi}^2}{S_{\mathrm{b}3\phi}}$$

把相电压用线电压替换，可得

$$Z_{\mathrm{b}}=\frac{\left(\frac{V_{\mathrm{bL-L}}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{\mathrm{b}\phi}}=\frac{V_{\mathrm{bL-L}}^2}{3S_{\mathrm{b}\phi}}=\frac{V_{\mathrm{bL-L}}^2}{S_{\mathrm{b}3\phi}} \tag{2-97}$$

2.7　三相变压器建模

三相变压器阻抗的图示与 3 个单相变压器相同。首先讨论三相变压器是如何构成的[9-13]。

三相变压器是由 3 个单相变压器构成的。

图 2-48 画出的是由 3 个单相变压器构成的三相变压器。

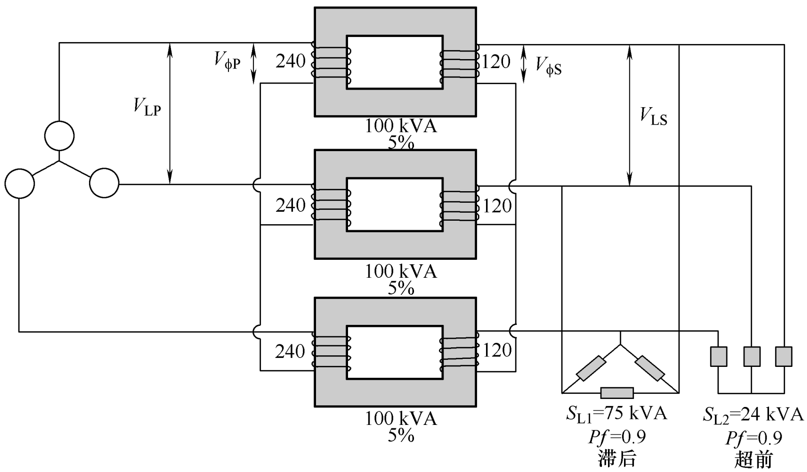


图 2-48　3 个单相变压器连接为Y-Y联结的三相变压器组

图 2-48 中，每个单相变压器的额定参数为 240V/120V，100kVA，短路电抗为 5%，其基值为变压器额定电压和额定功率。3 个单相变压器的连接方式是Y-Y联结，组成的三相变压器组的额定线电压为$\sqrt{3}\times240$V 和$\sqrt{3}\times120$V，300kVA，短路电抗为 5%。图 2-48 电路的单线图如图 2-49 所示。它的线电压为

$$V_{LP}=240\times\sqrt{3}\text{V}=415.2\text{V}$$

$$V_{LS}=120\times\sqrt{3}\text{V}=207.6\text{V}$$

图 2-50 是图 2-48 电路的单相等效电路。该图中，短路电抗在高压侧以实际值给出（单位为 Ω）。

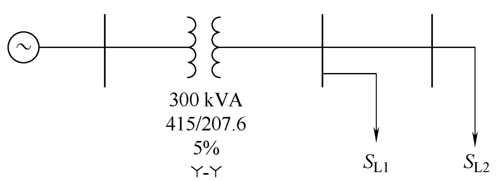


图 2-49　图 2-48 电路的单线图

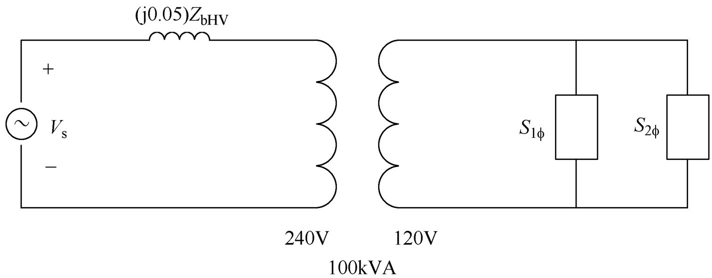


图 2-50　图 2-48 电路的单相等效电路模型

图 2-51 是图 2-48 的标幺值等效模型。功率基值和电压基值如图中所示。

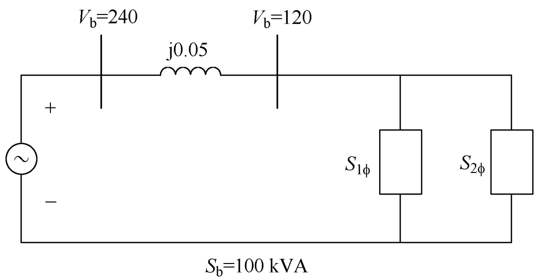


图 2-51　图 2-48 电路的标幺值等效电路

另一种重要的三相变压器类型是中性点接地的Y-△联结，如图 2-52 所示。该图显示了耦合绕组。如标注为 N_{P1} 的绕组与 N_{S1} 绕组耦合；同样，N_{P2} 与 N_{S2} 耦合，N_{P3} 与 N_{S3} 耦合。

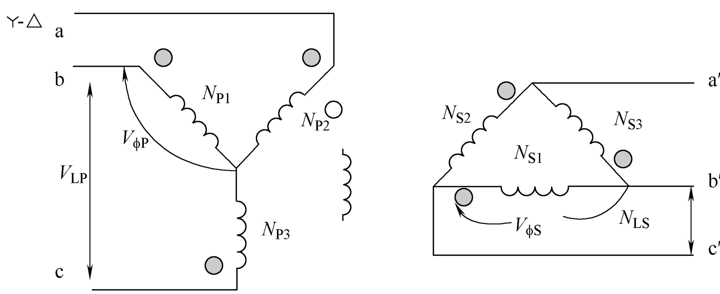


图 2-52　三相Y-△联结

图 2-53 表示了Y-△联结变压器的相移。因为Y-△联结变压器存在相移，所以它们除非相序适当，否则不能并联。因此，在把两台Y-△变压器联结之前，读者会争论是要研究 IEEE 关于变压器并联的标准，还是按产业实践经验[12]。图 2-52 中的大黑点表示每个绕组的对应正极性端。所以读者可以去复习电路课内容来理解黑点的含义。

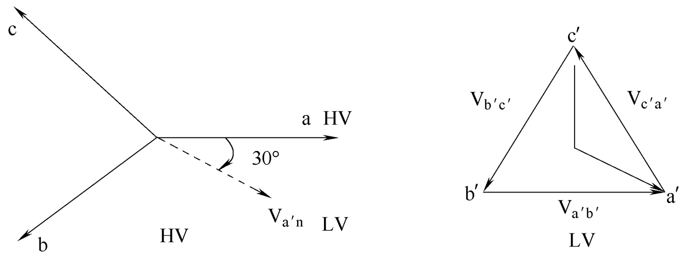


图 2-53　Y-△变压器中的 30°相移

2.8　抽头接换变压器

图 2-54 是一台三相抽头接换变压器。负荷抽头接换（Load Tap Changer，LTC）变压器有两类。如果抽头在带负荷情况下切换，则这种变压器称为有载抽头接换（Tap Changer Under Load，TCUL 或 On-Load Tap Changer，OLTC）。对于无载抽头接换变压器，抽头接换需要在无负荷时进行。

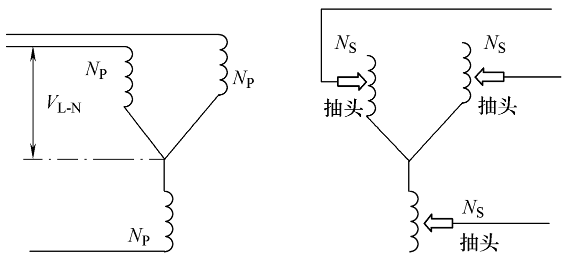


图 2-54　三相Y-Y联结抽头接换变压器的示意图

抽头接换变压器的构造是在几匝之后引出一个连接点。抽头可以只在一个绕组上，也可以两个绕组上都有。这类变压器可以进行电压调节。

电力系统的电压稳定性是负荷类型的函数。感性负荷吸取滞后电流，会导致负荷电压下降。容性负荷吸取超前电流，会导致负荷电压上升。电容器、电抗器及有载抽头接换变压器等电压控制元件被用来调节电网母线电压。如果使用抽头接换，抽头分接点通常放在电流较小的高压侧，因为这会降低触头处理电流的要求。然而，变压器也可能在两个绕组上都有抽头接换。

在配电网中，降压变压器在一次绕组安装无载抽头接换，在二次绕组安装有载抽头接换。通常高压抽头是受控调节的，使得与次输电电压匹配。

对于 LTC 变压器需要定义几个术语。标称匝数比指一次绕组和二次绕组的所有线匝都承载电流的情况，即

$$\frac{V_{\text{HV}}}{N_{\text{HV}}}=\frac{V_{\text{LV}}}{N_{\text{LV}}}\text{或}\frac{V_{\text{HV}}}{V_{\text{LV}}}=\frac{N_{\text{HV}}}{N_{\text{LV}}}=a$$

非标称匝数比指一个或两个绕组的一部分线匝不承载电流的情况。

使用标称匝数比时，电压基值选择为

$$V_{\text{bHV}}=\frac{V_{\text{HV}}}{V_{\text{LV}}}\times V_{\text{bLV}}$$

$$V_{\text{bLV}}=\frac{V_{\text{LV}}}{V_{\text{HV}}}\times V_{\text{bHV}}$$

例 2.10 一台单相抽头接换变压器的一次侧匝数为 2000，二次侧的匝数变化情况（$N_{\text{sec max}}=7300$，$N_{\text{sec min}}=5300$）如图 2-55 所示。计算二次电压的最大值和最小值。假定一次电压最大值为 36.4kV。

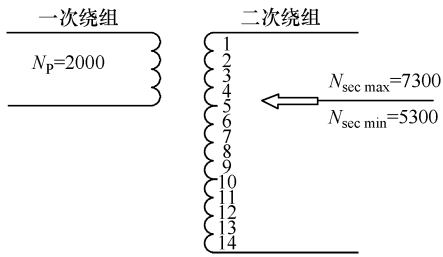


图 2-55 一台三相Y-Y联结抽头接换变压器的示意图

解

$$\frac{V_{\text{p}}}{2000}=\frac{36.4\times10^{3}\text{V}}{2000}=18.2\text{V/匝}$$

$$\frac{V_{\text{p}}}{2000}=\frac{V_{\text{sec}}}{N_{\text{sec max}}}=18.2\text{V/匝}=\frac{V_{\text{sec}}}{7300},\quad V_{\text{sec}}=132.86\text{kV}$$

$$\frac{V_{\text{p}}}{2000}=\frac{V_{\text{sec}}}{N_{\text{sec min}}}=18.2\text{V/匝}=\frac{V_{\text{sec}}}{5300},\quad V_{\text{sec}}=96.46\text{kV}$$

因此，二次电压可以在 96.46～132.86kV 之间变换。

2.9 输电线建模

我们知道，电力大部分通过三相系统输送[9-13]。每相使用的导线都有电阻、电感和电容。在电网分析中，对输电系统建模时，需要开发分布式电阻、电感和电容的模型，用每英里（mile）㊀或每千米（km）参数的集中参数模型表示。输电线路

㊀ 译者注：英里（mile），英制长度单位。1mile＝1.609344km。

的作用是在设计电压下承载电流。输电线路的电压根据线路必须承载的功率值（通常以 MVA 为单位）确定。电流额定值根据导线尺寸和它的热额定值确定。通常，导线尺寸用它截面积的圆密耳㊀（Circular Mil，CM）面积表示。圆密耳（CM）的定义是

$$CM = d^2 \tag{2-98}$$

式中，d 是导线直径。因此，1mil = 0.001in，反之，1in = 1000mil。而导线截面积 A（CM）可表示为

$$A = d^2$$

CM 也被制造商用来表示不同级别的导线和电缆。

输电线的电感和电容是导线电流和电压产生的磁场和电场作用的结果。对地电导（$G=1/R$）通常很小，因为与地线和导线附近其他金属元件耦合的漏磁链产生的漏电流非常小，所以这一电导通常忽略不计。构建输电线模型需要 R、L 和 C 的参数。线路电感可通过流经导线的电流产生的磁链来计算。线路电容可通过沿导线的电压分布计算。

圆柱形实心导线既有内电感，也有外电感[9,10]。

图 2-56 是两线输电线。它的总电感（H/m）为

$$L = 4\times10^{-7}\ln\frac{D}{r'} \tag{2-99}$$

式中，$r' = re^{-1/4} = 0.7788r$。

r'称为导线的几何平均半径（Geometric Mean Radius，GMR）。

我们知道，两根电压不同的带电导线的作用如同电容器。它的电容可通过导线电荷和导线之间以及对地的标幺值电压差来计算。中性点导线是接地的。然而，由于中性点导线接地，所以它通常不承载电流，除非发生了故障，如高压导线偶然接地。通过基础电磁计算可求得图 2-57 所示的两导线之间的电容为

$$C_{12}(\mu F/mile) = \frac{0.0388}{2\cdot\ln\frac{D}{r}} \tag{2-100}$$

式中，D 是两导线之间的距离；$1\mu F = 10^{-6}F$；r 是导线半径。

$$C_{1n}(\mu F/mile) = \frac{0.0388}{\ln\frac{D}{r}} \tag{2-101}$$

以上两式中，C_{12}是两导线之间的电容；C_{1n}是导线对中性点电容。在输电线建模中，关注的是等效容抗 X_c。对中性点导线的容抗（Ω/mile）为

㊀ 译者注：密耳（mil）和圆密耳（CM）都是英制单位，$1mil = 2.54\times10^{-5}m$，$1CM = 5.067\times10^{-10}m^2$。

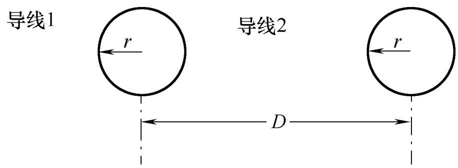


图 2-56　两线输电线

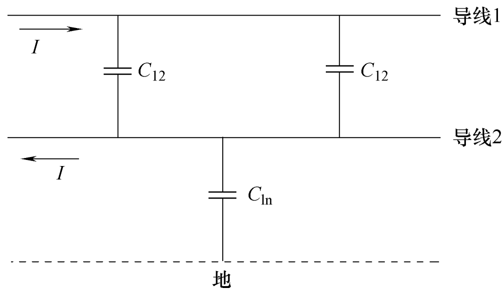


图 2-57　两导线之间及对地的电容

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{4.10}{f} \times 10^6 \cdot \log\left(\frac{D}{r}\right) \quad (2\text{-}102)$$

式中，f 是频率，C 是电容（F）。

图 2-58 表示的是间距均衡的三相输电线。三相输电线的电感为

$$L_a(\mathrm{H/m}) = 2 \times 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{r'}\right) \quad (2\text{-}103)$$

$$L_a(\mathrm{mH/mile}) = 0.7411 \cdot \log\left(\frac{D}{r'}\right) \quad (2\text{-}104)$$

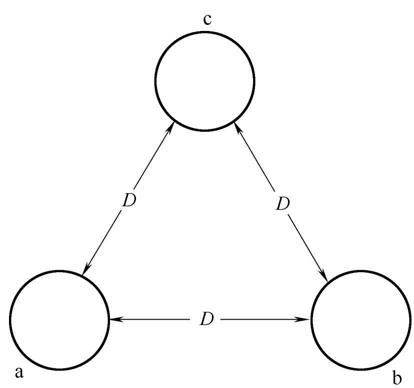


图 2-58　间距均衡的三相输电线的电感

由于各导线之间是对称的，所以 $L_a = L_b = L_c$。

使用分裂导线的三相输电线用于高电压大功率输电，如图 2-59 所示。

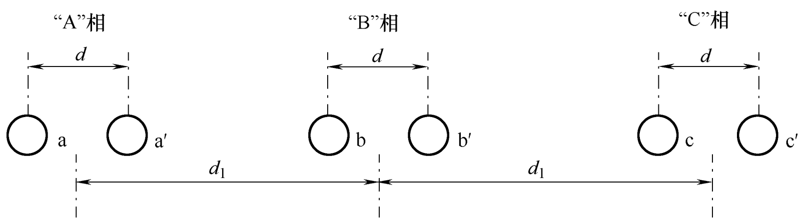


图 2-59　使用分裂导线的三相输电线

对于分裂导线，可使用等值间距 D_{eq}。因此，电感 L 的计算公式为

$$L(\mathrm{H/m}) = 2\times10^{-7}\times\ln\frac{D_{eq}}{D_s^6} \tag{2-105}$$

式中，

$$D_{eq} = \sqrt[3]{d_1\times d_1\times 2d_1} = d_1\sqrt[3]{2} \tag{2-106}$$

$$D_s^6 = \sqrt[4]{D_{aa}\cdot D_{aa'}\cdot D_{a'a}\cdot D_{a'a'}} \tag{2-107}$$

$$D_s = D_{aa} = 0.7788r \tag{2-108}$$

D_s 定义为三相线路分裂相导线的 GMR。

通常，一相分裂导线的导线间距表示为 $D_{a'a'} = D_s$。很多厂家都把 D_s 值以表格形式给出。

$$D_s^6 = \sqrt[4]{D_s\cdot D_s\cdot d\cdot d} = \sqrt{D_s\cdot d} \tag{2-109}$$

式中，D_s 是三相线路中一组分裂导线的导线束 GMR。

三相输电线的电容可以同样方法计算：

$$C_{正序} = C_{12} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{D_{eq}}{D_{sc}^6}} \tag{2-110}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{d_1\times d_1\times 2d_1} = d_1\sqrt[3]{2} \tag{2-111}$$

$$D_{sc}^6 = \sqrt{rd} \tag{2-112}$$

由于在输电杆塔之间建造均衡间距导线造价昂贵，所以输电线路都建成导线非对称间距的，然而各相间距接近，并且进行换位。这是指每经过几基杆塔的几英里之后，各相位置交换。图 2-60 画出的就是换位的三相输电线。

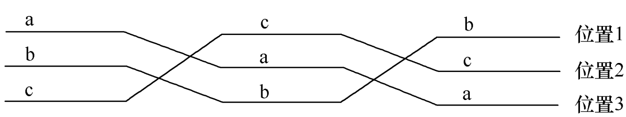


图 2-60　换位三相输电线

因为换位线路的相间距几乎相等，可以认为这种三相线路的各相电阻、电感和电容都是相等的。

$$L_a(\mathrm{mH/mile}) = L_b = L_c = 2\times10^{-7}\times\log\frac{D_{eq}}{r'} \tag{2-113}$$

$$L(\mathrm{H/m}) = 2\times10^{-7}\times\ln\frac{D_{eq}}{D_s^6} \tag{2-114}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}\times D_{23}\times D_{31}} \tag{2-115}$$

$$X_L = 2\pi\cdot f\cdot L \tag{2-116}$$

三相线路对中性点的电容为

$$C_n(\mathrm{F/m}) = \frac{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_r}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right)} \tag{2-117}$$

式中，ε 是自由空间的介电常数，$\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12}$，而 ε_r 是空气的相对介电常数，等于 1。

60Hz 下，X_c 的计算公式为

$$X_c(\mathrm{k\Omega/mile}) = 29.7 \times \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) \quad \text{对中性点} \tag{2-118}$$

在电容计算中，D_s 是导线外半径。

过去，输电线路参数由导线制造商计算，并列成表格供设计人员使用。然而，现在已经有了可以进行各种间距的输电线的参数计算及线路设计的软件包。这里介绍如何在本书的设计中使用表格选择线路电抗参数以及线路充电容抗。

通常，多数制造商使用 GMR 值计算线路参数，以 ft 和 mile 或 m 和 km 为单位。感抗的计算公式是

$$X_L(\Omega/\mathrm{mile}) = 2.02f \times 10^{-3}\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) \tag{2-119}$$

式中，D_{eq}是导线间距。表格中的 GMR 等同 D_s。

某些导线制造商列出的导线数据是标准间距 1 加间距 D 的数值：

$$X_L(\Omega/\mathrm{mile}) = 2.02f \times 10^{-3}\ln\left(\frac{1}{GMR}\right) + 2.02f \times 10^{-3}\ln D \tag{2-120}$$

在这一公式中，GMR 和 D 的单位都必须是 ft，f 的单位是 Hz。然而，因为 1mile = 1.6km，所以在计算感抗时很容易把它变换为公制表示。上述公式中，第一项是 1ft 间距的感抗，第二项是间距因数的感抗。

可以预见到，电感和电容都是沿线路分布的。因此，可以假设如图 2-61 所示的分布参数模型。

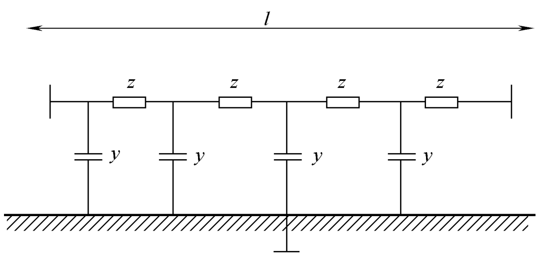


图 2-61 输电线路的分布模型

在输电线的分布模型中，可以定义以下各量：

$$z(\Omega/\mathrm{m}) = R + \mathrm{j}\omega L \quad \text{单位长度串联阻抗}$$

$$y = G + \mathrm{j}\omega C \quad \text{单位长度并联导纳}$$

$$Z(\Omega)=zl \quad l=\text{线路长度,单位为 m}$$

$$Y(\Omega^{-1})=yl$$

图 2-62 画出的是输电线的集中参数模型。这一模型的参数可用导线制造商提供的输电线数据算得。

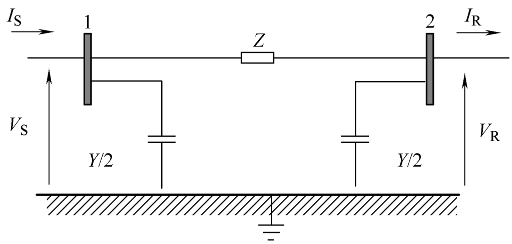


图 2-62　输电线的一般模型

应该指出，这里的讨论只限于架空线。这里介绍的只是与架空导线选择和电网分析设计有关的最基本概念。尽管这一介绍非常简单，但读者可以了解微电网设计是基于选择电网元件然后进行分析以获得期望性能来进行的。通贯全书的设计中要多次用到这一概念。

最后，必须指出，如果选用绝缘电缆，则选择过程是非常复杂的。绝缘电缆中，绝缘内产生的热量是最重要的问题：电缆的选择不仅要基于它必须承载的负荷电流，还需要能在偶发短路产生的大幅值暂态即故障电流下安全运行。这里不进一步讨论这一问题，但读者可以参考其他文献[10]。

附录 B 给出了架空线的典型数据。一定要记住，线路的载流能力是导线的热额定。它能输送的功率基于线路的额定电压。线路的额定电压根据绝缘要求以及导线间距的设计来确定。因此，需要先选择电压，然后计算线路的功率承载能力。

线路电流按下式确定

$$I_L=\frac{S}{\sqrt{3}\times V_{L-L}\times pf}$$

式中，S 是潮流，V_{L-L}是线间电压，pf 是功率因数。

导线选择首先根据选择线路的载流容量；然后需要考虑线路的电压降和损耗。因此，视设计要求，可以选取载流容量较高的导线。

例 2.11　三相发电机向电网供电的功率为 1MW，功率因数为 0.9 滞后。发电厂距当地电网 15mile。钢芯铝导线（Aluminum Steel Conductor Reinforced，ASCR）的数据如附录 B 所示。进行以下计算：

1）如果输电电压为 460V，选择输送该功率的 ASCR 架空导线。如果负荷电压规定为 AC 460V，那么发电机电压是多少？

2）如果输电电压为 3.3kV，选择输送该功率的 ASCR 架空导线。如果负荷电压规定为 AC 3.3kV，那么发电机电压是多少？

3）如果输电电压为11.3kV，选择输送该功率的ASCR架空导线。如果负荷电压规定为AC 11.3kV，那么发电机电压是多少？

4）计算每一设计中的有功功率损耗和无功功率损耗，把计算结果列表，并加以讨论。

解

系统的单相等效电路如图2-63所示。

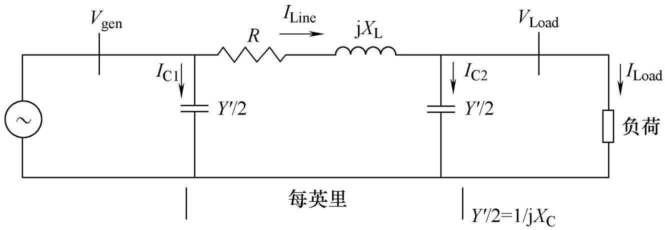


图2-63　例2.11系统的单相等效电路

负荷电流为

$$I_{Load} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{L-L} \times pf}$$

式中，S是潮流，V_{L-L}是负荷的线电压，pf是负荷的功率因数。

1）负荷电压为460V时，负荷电流为

$$I_{Load} = \frac{1 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 460 \times 0.9} A = 1394A$$

因为导线承载的电流为1.39kA，我们选择表B-2㊀（附录B）第1行的1590kCM的导线。从该表查得，这种导线的电阻为25℃下0.0591Ω/mile。

该导线的串联电抗在表B-2（附录B）第1行第6列查得，为0.359Ω/mile。从第1行第7列查得容抗为0.0814MΩ/mile。如图2-63所示，把上述值的一半用于输电线的等效π形模型中，以它们的电纳$Y'/2 = 1/jX_C$表示。因此，

$$X_C = \frac{0.0814}{2} M\Omega/mile = 0.0407 M\Omega/mile$$

图2-63中，线路充电电流为㊁

$$I_{C1} = \frac{V_{Load}}{jX_C} \times 距离 = \frac{460/\sqrt{3}}{j0.0407 \times 10^6} \times 15A = 97.88\angle 90°mA$$

可以看出，线路充电电流是毫安级的，与负荷电流相比可以忽略。因此，图2-63的单相等效电路可简化为图2-64。忽略线路充电电抗，因为它们与负荷阻抗

㊀ 译者注：原文误为表B-1。

㊁ 译者注：原文把下式结果误写为97.81.82∠90°mA，已改正。

相比非常大。从图 2-64 可以看出，线路电流 I_{Line} 等于负荷电流 I_{Load}：

$$I_{Line} = I_{Load}$$

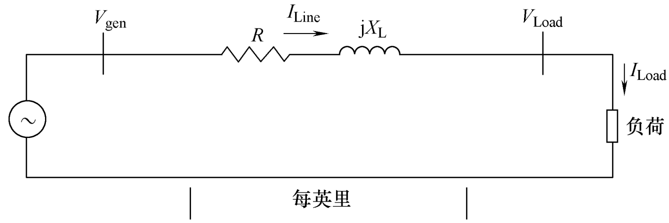


图 2-64　忽略线路充电电容后，图 2-63 的简化电路

在单相等效电路中，所有各量都是一相的数值。发电机和负荷都假定为Y形联结，它们的相电压为

$$V_{ph} = V_{L-L}/\sqrt{3}$$

式中，V_{ph}是相电压（线对中性点），V_{L-L}是线电压。

根据基尔霍夫电压定律和图 2-64，发电机相电压为

$$\begin{aligned} V_{gen} &= V_{Load} + I_{Line}(R + jX_L) \\ &= \frac{460}{\sqrt{3}} + 1394\angle -\arccos 0.9 \times 15 \times (0.0591 + j0.359) \\ &= 7767\angle 53.21°\text{V} \end{aligned}$$

发电机线电压为 $V_{L-L} = \sqrt{3}V_{gen} = \sqrt{3} \times 7767\text{V} = 13.5\text{kV}$。

功率损耗为

$$S_{loss} = 3I_L^2 \cdot Z = 3 \times 1394^2 \times 15 \times (0.0591 + j0.359)$$

$$S_{loss} = P_{loss} + jQ_{loss} = (5.16 + j31.41) \times 10^6$$

因此，有功功率损耗为 $P_{loss} = 5.16\text{MW}$，无功功率损耗为 $Q_{loss} = 31.41\text{Mvar}$。

从上述分析可以看出，功率损失相当大。下面选择线路电压 3.3kV 来输送功率到负荷。

2）负荷电压为 3.3kV 时，负荷电流为

$$I_{Load} = \frac{1 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 3.3 \times 10^3 \times 0.9}\text{A} = 194\text{A}$$

因为导线承载的电流为 194A，我们从表 B-2（附录 B）选择最后一行 266.8kCM 的导线。从表 B-2 第 4 列查得，这种导线的电阻为 25℃下 0.350Ω/mile。导线串联电抗在表 B-2 第 6 列最后一行给出，为 0.465Ω/mile。并联容抗在第 7 列最后一行给出，为 0.1074MΩ/mile。

如图 2-63 所示，把上值的一半用于输电线的等效 π 形模型中，以它们的电纳 $Y'/2 = 1/jX_C$ 表示。因此，

$$X_C = \frac{0.1074}{2}\text{M}\Omega/\text{mile} = 0.0537\text{M}\Omega/\text{mile}$$

图 2-63 所示的充电电流为[㊀]

$$I_{C1}=\frac{V_{Load}}{jX_C}\times 距离$$

$$=\frac{3.3\times10^3/\sqrt{3}}{j0.0537\times10^6}\times15A=0.532\angle90°A$$

完全可以忽略线路充电电流，因为它与负荷电流相比非常小。把基尔霍夫电压定律用于图 2-64 的电路，可得到发电机相电压为

$$V_{gen}=V_{Load}+I_{Line}(R+jX_L)$$

$$=\frac{3300}{\sqrt{3}}+194\angle-\arccos0.9\times15\times(0.350+j0.465)$$

$$=3.5\angle53.21°kV$$

发电机线电压为

$$V_{L-L}=\sqrt{3}V_{gen}=\sqrt{3}\times3.5kV=6.06kV$$

功率损耗为

$$S_{loss}=3I_L^2\cdot Z=3\times194^2\times15\times(0.350+j0.465)$$

$$=(0.57+j0.78)\times10^6$$

$$S_{loss}=P_{loss}+jQ_{loss}$$

因此，有功功率损耗为 $P_{loss}=0.57MW$，无功功率损耗为 $Q_{loss}=0.78Mvar$。

可以看出，提高输电电压可以降低功率损耗。下面我们将评估，如果线路电压选择为 11.3kV，功率损耗情况会如何。

3）负荷电压为 11.3kV 时，负荷电流为

$$I_{Load}=\frac{1\times10^6}{\sqrt{3}\times11.3\times10^3\times0.9}A=57A$$

选择与 2）相同的导线。从表 B-2（附录 B）可知，对于 57A 电流，导线电阻为 0.350Ω/mile。导线串联电抗从表 B-2 可知为 0.465Ω/mile。并联容抗在第 7 列最后一行给出，为 0.1074MΩ/mile。

因此，

$$X_C=\frac{0.1074}{2}M\Omega/mile=0.0537M\Omega/mile$$

图 2-63 所示电路的线路充电电流为

$$I_{C1}=\frac{V_{load}}{jX_C}\times 距离=\frac{11.3\times\frac{10^3}{\sqrt{3}}\times15}{j0.0537\times10^6}A=1.82\angle90°A$$

㊀ 译者注：原书中下式的表达方式和结果数值都有错误，已改正。

这种情况下，线路充电电流与负荷电流幅值已经有可比性了，因此不能忽略线路充电电抗。把基尔霍夫电流定律用于图 2-63 的电路，线路电流为

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{Line}} &= I_{\mathrm{Load}} + I_{\mathrm{C1}} \\ &= 57\angle -\arccos 0.9 + 1.82\angle 90^{\circ} \\ &= 56.2\angle -24.2^{\circ}\mathrm{A} \end{aligned}$$

发电机相电压为

$$\begin{aligned} V_{\mathrm{gen}} &= V_{\mathrm{Load}} + I_{\mathrm{Line}}(R + \mathrm{j}X_{\mathrm{L}}) \\ &= \frac{11300}{\sqrt{3}} + 56.2\angle -24.2^{\circ} \times 15 \times (0.350 + \mathrm{j}0.465) \\ &= 6.96\angle 1.95^{\circ}\mathrm{kV} \end{aligned}$$

发电机线电压为

$$V_{\mathrm{L-L}} = \sqrt{3}V_{\mathrm{gen}} = \sqrt{3} \times 6.96\mathrm{kV} = 12.1\mathrm{kV}$$

功率损耗为

$$S_{\mathrm{loss}} = 3I_{\mathrm{L}}^{2} \cdot Z = 3 \times 56.2^{2} \times 15 \times (0.350 + \mathrm{j}0.465)$$

$$S_{\mathrm{loss}} = P_{\mathrm{loss}} + \mathrm{j}Q_{\mathrm{loss}} = (49.8 + \mathrm{j}66) \times 10^{3}$$

因此，有功功率损耗为 $P_{\mathrm{loss}} = 49.8\mathrm{kW}$，无功功率损耗为 $Q_{\mathrm{loss}} = 66.0\mathrm{kvar}$。

线电压为 11.3kV 时，功率损耗相当低。

4）各种电压等级下的有功和无功损耗见表 2-1。

表 2-1　不同线电压等级下的有功和无功损耗

电压/kV	有功功率/MW	无功功率/Mvar
0.460	5.16	31.41
3.3	0.57	0.78
11.3	0.050	0.066

从表 2-1 可以看出，提高输电电压可以大大降低损耗。

例 2.12　如果例 2.11 中的发电机是 PV 电站，而且希望 PV 母线运行于 1.0 功率因数，那么需要在 PV 母线或负荷母线上加多少无功功率，如果功率以 3.3kV 输送？

解

例 2.11 中，负荷功率为 1MW，功率因数为 0.9 滞后。

所以，功率因数角为 arccos 0.9 = 25.84°。

负荷的额定视在功率为

$$S_{\mathrm{load}} = \frac{P}{pf} = \frac{1\mathrm{MW}}{0.9} = 1.11\mathrm{MVA}$$

因此，负荷消耗的无功功率为

$$Q = 1.11\mathrm{MVA}\sin 0.9 = 0.48\mathrm{Mvar}$$

由表 2-1，输电线的无功功率损失为

$$Q = 0.78\text{Mvar}$$

所以消耗的总无功功率为

$$Q_{消耗} = 0.78\text{Mvar} + 0.48\text{Mvar} = 1.26\text{Mvar}$$

线路充电电容会向系统提供一定无功功率。线路充电电容提供的无功功率为（见图 2-63）：

$$Q_{发出} = \left(\frac{V_{\text{gen}}^2}{X_\text{C}} + \frac{V_{\text{Load}}^2}{X_\text{C}}\right) \times 距离 = \frac{(6.06\times10^3)^2 + (3.3\times10^3)^2}{0.0537\times10^6} \times 15$$
$$= 13.3\text{kvar}$$

发电机提供的净无功功率为 $Q_{\text{gen}} = Q_{消耗} - Q_{发出} = 1.26\text{Mvar} - 0.013\text{Mvar} = 1.25\text{Mvar}$

因此，PV 母线必须提供 1.25Mvar 的无功功率。换句话说，必须有 1.25Mvar 的容性负荷接到 PV 母线。

本章已经阐述了如何将电路理论的基础知识延伸到电力系统分析。本章研究了负荷阻抗的含义，负荷的功耗模型，电气设备的额定值，单相和三相变压器的建模。本章还探讨了标幺值系统的基本概念，了解了如何开发标幺值模型——以可再生能源为电源的三相配电系统。

下一章将研究智能电网的概念及智能微电网可再生能源系统的设计。

习　题

2.1　假定 $a = 120 + \text{j}100$，$b = 100 + \text{j}150$，$c = 50 + \text{j}80$。进行以下复数运算：

1）$(a \times b)/c$

2）$(a/b) \times c$

3）$(a - b)/(c - a)$

2.2　$V = 120\cos(377t + 5°)$。如果用一块电压表测量这一电压，电压表的读数值会是多少？用极坐标形式表示这一电压。

2.3　交流电机（特别是变压器和感应电机）的运行可借助下面图 2-65 的 T 形电路进行研究。假定频率为 60Hz。电路元件如下表所示。

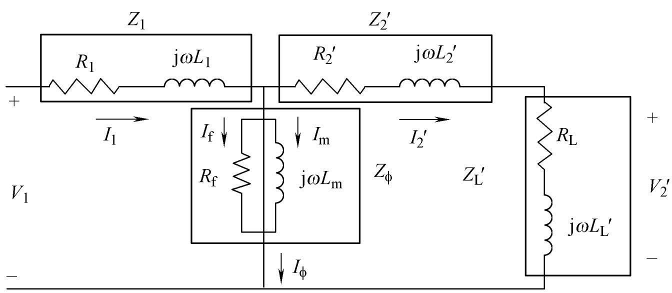


图 2-65　习题 2.3 的等效电路

	R_1	L_1	R_f	L_m	R'_2	L'_2	R_L	L_L	V_1	V_2	I_1	I'_2	I_f
1	1	0.01	1000	8	1	0.01	待定		480	?	?	?	?
2	1	0.01	1000	8	1	0.01	200	0	480	?	?	?	?
3	0.02	0.00265	待定		0	0	待定		1	?	?	?	?
4	0.02	0.00265	待定		0	0	1	0	1	?	?	?	?
5	0.02	0.00265	待定		0	0	0.707	1.875×10^{-3}	?	1	?	?	?
6	0	0	100	0.1	0.01	106×10^{-6}	1	0	1	?	?	?	?
7	0	0	100	0.01	0.01	106×10^{-6}	1.414	3.75×10^{-3}	1	?	?	?	?
8	0.3	1.33×10^{-3}	待定	3.45×10^{-2}	0.15	0.56×10^{-3}	7.35	0	127	?	?	?	?
9	10	5.2×10^{-2}	待定	0	0	200	0.4	0	500	?	?	?	?
10	0.15	2.54×10^{-3}	待定	1.57	6.24×10^{-3}	98.5	0.178	0	240	?	?	?	?
11	0.3	0.003	1	4.25×10^{-2}	0.2	0.003	10	0	440	?	?	?	?
12	0.3	0.003	0	4.25×10^{-2}	0.2	0.003	1	0	380	?	?	?	?

所有复数都用极坐标形式表示。分析第 1 ~ 12 组元件的情况。分别显示计算步骤。

2.4　假定负荷三相平衡。每相负荷定值为 120Ω，相位角 10°，负荷为Y形联结。额定电压为 240V 的三相平衡电源向该三相负荷供电。进行以下运算：

1）画出该负荷的三相电路。

2）计算该负荷消耗的有功功率和无功功率。

2.5　假定单相负荷的电感为 10mH，电阻为 3.77Ω，接到 60Hz、120V 的电源。计算负荷消耗或发出的有功功率和无功功率。

2.6　假定单相负荷的电容为 10mF，电阻为 2.0Ω，接到 60Hz、120V 的电源。计算负荷消耗或发出的有功功率和无功功率。

2.7　一个单相负荷在 220V，功率因数为 0.9 滞后条件下消耗的功率为 10kW。它从电源汲取的电流的幅值和相位角都是多少？如果另有一个额定功率为 10kW，功率因数为 0.8 超前的单相负荷并联结到同一电源，那么从电源汲取的电流又是多少？以极坐标形式给出答案。

2.8　一台单相变压器的额定值为 200kVA，120/200V，短路电抗为 5%。从高压侧计算该变压器的电抗，并画出单相等效电路。

2.9　计算习题 2.7 的标幺值模型。功率和电压基值分别取 400kVA 和 440V。

2.10　3 台单相变压器每台的额定值为 460V/13.2kV，400kVA，短路电抗为 5%。这 3 台单相变压器接为三相Y-Y联结的变压器组。进行以下计算：

1）三相Y-Y联结变压器的高压侧及低压侧的额定电压及额定容量。

2）计算三相变压器的标幺值模型。

2.11　一组三相Y-Y联结的30Ω阻性负荷，用阻抗为1+j10Ω的馈电线接到习题2.10[㊀]变压器的低压侧。进行以下计算：

1）给出三相等效模型。

2）给出单线图。

3）基于变压器额定值计算标幺值模型。

2.12　3台单相变压器每台的额定值为460V/13.2kV，400kVA，短路电抗为5%。这3台单相变压器接为三相Y-△联结的变压器组。进行以下计算：

1）三相Y-△联结变压器的高压侧及低压侧的额定电压及额定容量。

2）计算三相变压器的标幺值模型。

2.13　一组三相Y-Y联结的30Ω阻性负荷，用阻抗为1+j10Ω的馈电线接到习题2.12变压器的低压侧。进行以下计算：

1）给出三相等效模型。

2）给出Y联结等效电路的一相。

3）给出单线图。

4）基于变压器额定值计算标幺值模型。

2.14　3台单相变压器每台的额定值为460V/13.2kV，400kVA，短路电抗为5%。这3台单相变压器接为三相△-△联结的变压器。进行以下计算：

1）三相△-△联结变压器的高压侧及低压侧的额定电压及额定容量。

2）给出三相等值模型。

3）给出Y联结等效电路的一相。

4）基于变压器额定值计算标幺值模型。

2.15　一组三相△-△联结的30Ω阻性负荷，用阻抗为1+j10Ω的馈电线接到习题2.14变压器的低压侧。进行以下计算：

1）给出三相等效模型。

2）给出Y联结等效电路的一相。

3）给出单线图。

4）基于变压器额定值计算标幺值模型。

2.16　平衡三相三线馈电系统的负荷也是三相平衡的，如图2-66所示。

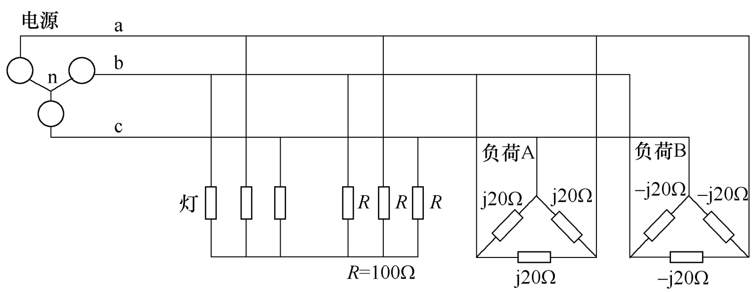


图2-66　习题2.16的三相示意图

㊀ 译者注：原文此处和后面有几处题号标错或写错，均按前后文内容改正，不再一一说明。

每盏灯的额定值为 100W，120V。馈电线的线电压为 240V，带负荷后保持不变。求馈电线的电源电流和电源供给的功率。

1）计算 a 相的线路电流。

2）计算电源供给的有功功率和无功功率。

2.17　考虑图 2-67 所示的三相配电馈线系统。

对于三相系统，所有电压都是线电压，它的复功率也都是三相功率。

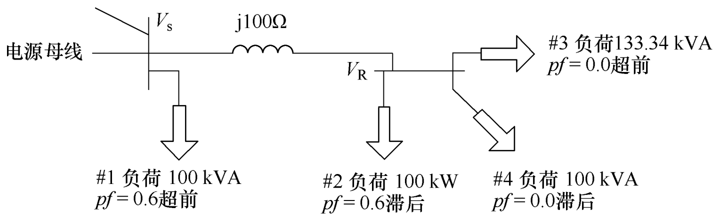


图 2-67　习题 2.17 的单线图

进行以下计算：

1）求电源电压 V_S，如果 V_R 保持 4.4kV 不变（线电压 V_R = 4.4kV）。

2）电源电流和电源的功率因数。

3）电源提供的总复功率。

4）要使电源母线的功率因数达到 1，需要在电源母线接多少无功功率？

2.18　假如三相变压器低压侧是Y联结接地的，高压侧是△联结绕组，如图 2-68 所示。抽头接换绕组的低压侧为 2000 匝，高压绕组侧的匝数是变化的。假定高压绕组侧的最大匝数为 7300，最小匝数为 5300。计算高压侧可以保持的最高线电压。假定低压侧绕组电压为 36.4kV。

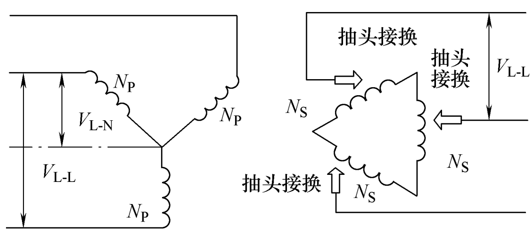


图 2-68　习题 2.18 的接线图

2.19　写一篇文章论述一个回收期为 25 年的 1MW 太阳能系统的资本金成本。假定燃煤电厂的成本为 0.10 美元/kWh，而 PV 的发电成本约为 0.25 ~ 0.40 美元/kWh。

2.20　三相发电机的额定值为 480V，400kVA，接到额定值为 3.2kV/480V，200kVA，短路电抗为 10% 的变压器，通过 1 + j20Ω 线路为负荷供电。在负荷处，使用 150kVA，7% 电抗的变压器把电压从 3.2kV 降到 220V。负荷处电压保持在 220V。进行如下计算：

1）画出单线图。

2）以基值 200kVA 和 480V 计算标幺值等效电路。

3）计算发电机需要的电压。这一设计是否可行？

参考文献

1. A Century of Innovation-Electrification National Academy of Engineering. Available at http://www.greatachievements.org. Accessed 2009 Sept 18
2. Wikipedia. Nikola Tesla. Available at http://en.wikipedia.org/. Accessed 2009 Sept 28.
3. Wikipedia. War of Currents. Available at *wkipedia.org/wiki/*. Accessed 2009 Jan. 28.
4. U.S. Energy Information Administration. Independent Statistics and Analysis. Available at http://www.eia.doe.gov. Accessed 2009 Sept 18.
5. California Energy Commission. Energy Quest. Glossary of Energy Terms. Available at http://www.energyquest.ca.gov/glossary/glossary-i.html#i. Accessed 2009 April 18.
6. U.S. Environmental Protection Agency. Clean Air Act. Available at http://www.epa.gov/air/caa/. Accessed 2009 Jan 25.
7. 3-Phase Power Resource Site. Available at http://www.3phasepower.org. Accessed 2009 Jan 28.
8. Majmudar H. Electromechanical energy converters. Boston, MA: Allyn & Bacon; 1965.
9. El-Hawary ME. Electric power systems: design and analysis. Reston, VA: Reston Publishing; 1983
10. Grainger J, Stevenson WD. Power systems analysis. New York: McGraw Hill; 2008.
11. Elgerd OI. Electric energy system theory: an introduction. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1982.
12. IEEE Brown Book. IEEE recommended practice for power system analysis. New York: Wiley-Interscience; 1980.
13. Chapman S. Electric machinery and power system fundamentals. New York: McGraw Hill; 2003.

第 3 章　微电网系统中的变换器建模

3.1　引言

DC/AC 逆变器的功能是将直流电源发出的直流电（DC）转换为正弦交流电（AC）。光伏电池是直流电源。高速微型燃汽轮机是高频交流电源。它设计为高速运行，体积小，重量轻。这类发电机使用天然气和燃料电池作为动力，但因其碳排放量小，故也被视为绿色能源。变速风电机组与微型燃汽轮机的运行原理相同，不同的是这种发电机是变速的，发出的交流电频率也是变化的。为使用这种变频电源，需要采用 AC/DC 整流器将交流电整流为直流电，再由逆变器将直流电逆变为工频交流电。这种风力发电形式如图 3-1 所示。

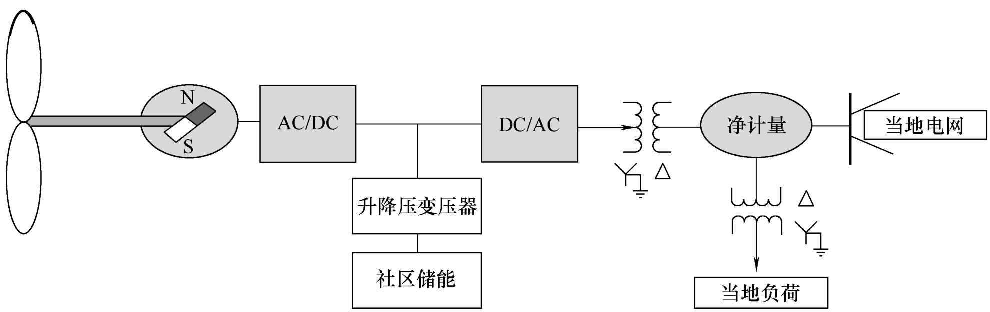


图 3-1　永磁直驱变速风电机组

上一章介绍了单相负荷、三相负荷、变压器以及采用通用标幺值概念的分布式发电系统建模。本章将介绍 DC/AC 逆变器、DC/DC 变换器及其在分布式发电的微电网中的作用（见图 3-2），同时研究作为大规模互联电网一部分的微电网设计中的绿色能源和可再生能源的建模方法。

3.2　单相两开关逆变器

图 3-3 所示为单相两开关逆变器。在可再生能源并网中，逆变器的作用是将直流电转换为电网运行频率下的交流电。单相两开关逆变器用于小功率发电系统，也称为单相半桥逆变器。脉宽调制技术（Pulse Width Modulation，PWM）用于产生与电网基波频率（50Hz 或 60Hz）一致的交流电压。两个电力开关管用连接在直流母

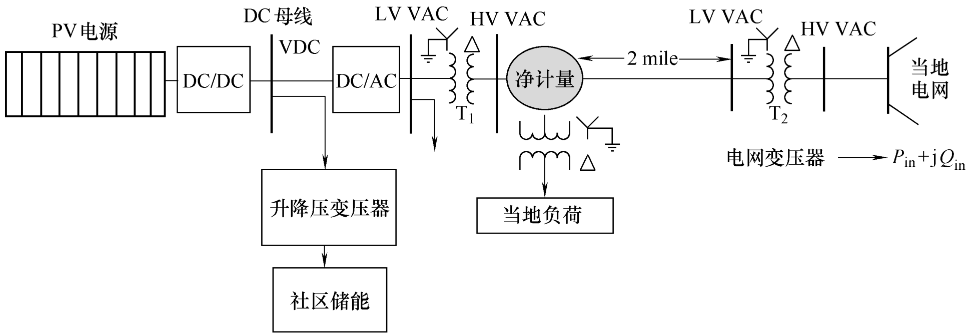


图 3-2　辐射状光伏微电网分布式发电系统

线上的反并联二极管交替开通和关断。用开关导通的方法可以在图 3-3 的节点 a 上产生时变电压。如果 SW_1^+ 导通，a 点电压为正；反之当 SW_1^- 导通时，a 点电压为负。为说明逆变器的工作原理，测试 a 点对直流母线负极上 n 点的电位。直流正极性母线对 n 点电压为 $+V_{idc}$。因此，如果 SW_1^+ 导通，则 V_{an} 等于 $+V_{idc}$；如果 SW_1^- 导通，V_{an} 等于 0。为在 a 点产生时变电压，用一个具有期望输出频率的正弦波与三角波比较以确定开关策略。其目的是采集直流电压，使采样脉冲电压频率与正弦波的基频相同。两个开关的通断时序由正弦波与三角波的相对值决定。

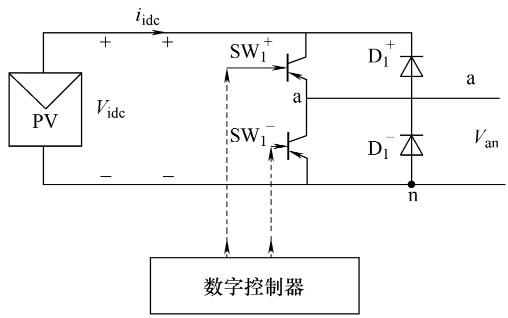


图 3-3　单相两开关 DC/AC 逆变器

图 3-4 为正弦 PWM 波示意图：两波形比较，一个是正弦波 V_C，为调制电压；另一个是三角波 V_T，幅值和频率均大于正弦波。采样周期为 $T_s=\frac{1}{f_s}$，f_s 是三角波频率。采集直流母线电压，使脉宽调制电压的频率与基准调制正弦波电压的频率相同。开关逻辑基于 V_T 与 V_C 比较。V_C 大于 V_T 时，SW_1^+ 导通，V_{an} 等于 V_{idc}；V_C 小于 V_T 时，SW_1^- 导通，V_{an} 等于 0。V_{an} 不是纯正弦波，而是包含直流分量、与基准调制电压频率相同的基频交流电压和谐波电压。

因此，两个电源开关的投切逻辑是：

1）如果 $V_C>V_T$，SW_1^+ 导通；SW_1^- 关断，$V_{an}=V_{idc}$；

2）如果 $V_C<V_T$，SW_1^- 导通；SW_1^+ 关断，$V_{an}=0$。

随着正弦波与三角波比较值的变化，V_{an} 基波分量与三角波和正弦波相比的幅值差成正比。图 3-5 显示了正弦波幅值减小时的波形。V_{an} 基波分量与正弦波的频率相同[㊀]。

㊀ 译者注：原文为"V_{an} 基波分量与三角波频率相同"，有误。现改为"V_{an} 基波分量与正弦波频率相同"。

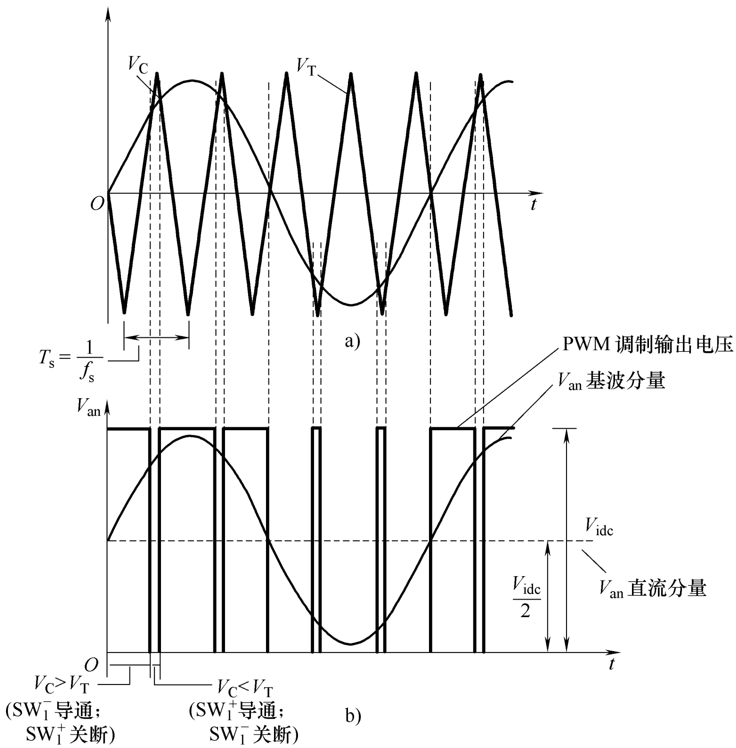


图 3-4　单相半桥 DC/AC 逆变器的 PWM 输出波形

交流输出电压的基波幅值与 V_C 和 V_T 的峰值之比成正比，定义 V_C 和 V_T 的峰值比为调制比 M_a：

$$M_a=\frac{V_{C(max)}}{V_{T(max)}} \tag{3-1}$$

输出电压的基波分量峰值为

$$V_{an,1}=\frac{V_{idc}}{2}M_a \tag{3-2}$$

输出电压的瞬时值为

$$V_{an}=\frac{V_{idc}}{2}+\frac{V_{idc}}{2}M_a\cdot\sin\omega_e t+\text{谐波} \tag{3-3}$$

式中，$\omega_e=2\pi\cdot f_e$，ω_e 为正弦波的角频率（rad/s），f_e 为正弦波频率（Hz）。

输出电压含有直流分量 $V_{idc}/2$ 和幅值为 $M_a\cdot V_{idc}/2$ 的基波以及谐波分量。M_a 值在 0～1 之间。存在直流分量会使感性负荷出现磁饱和。因此，感性负荷不能连接在 a 点和 n 点之间，但可接在 V_{ao} 端以滤除直流电压。

图 3-6 为逆变器带有两个电容器的拓扑结构示意图。从两电容器间可引出中间抽头，负荷接在 a 点和中间抽头 o 点之间。电容器 C^+ 和 C^- 电容值相同，每个电容

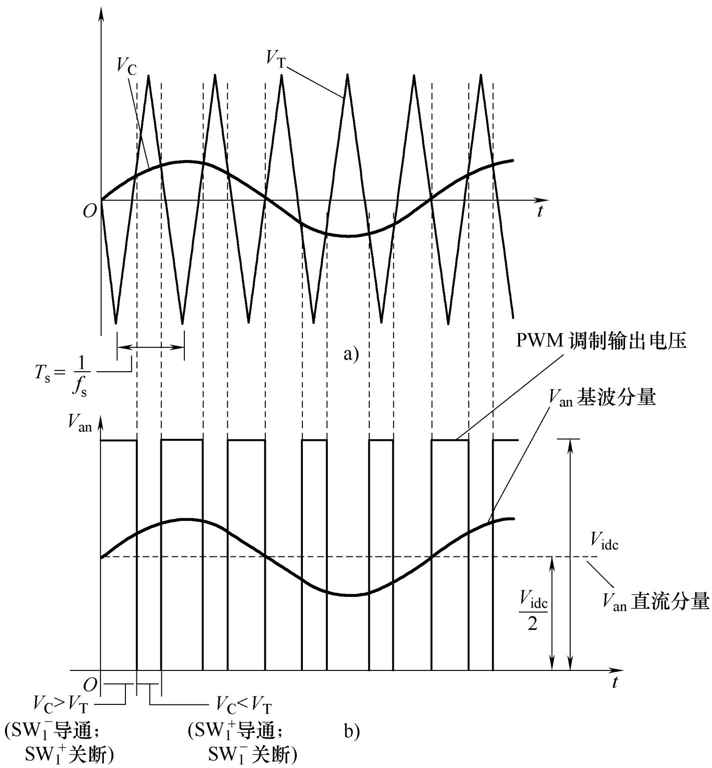


图 3-5 正弦波幅值减小时单相半桥 DC/AC 逆变器的 PWM 输出波形

器上的电压是 $V_{idc}/2$，o 点对 n 点的电位是 $+V_{idc}/2$。

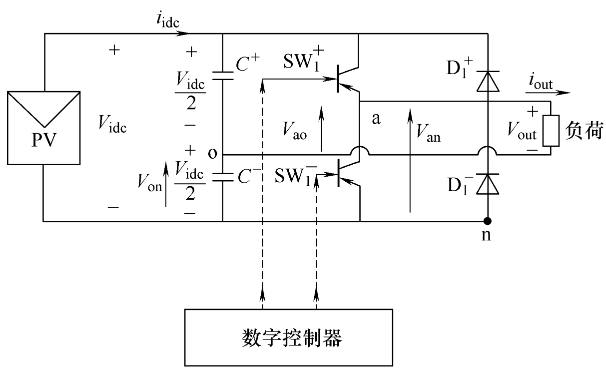


图 3-6 负荷接在中间抽头的单相半桥逆变器

采用带有两个电容器的拓扑结构可得到正、负输出电压。当 SW_1^+ 导通，SW_1^- 关断时，V_{an} 等于 V_{idc}。因为 V_{on} 为 $+V_{idc}/2$，故 V_{ao}（$=V_{an}-V_{on}$）为 $+V_{idc}/2$。类似地，当 SW_1^- 导通；SW_1^+ 关断时，V_{an} 等于 0，V_{ao} 为 $-V_{idc}/2$。如果电容足够大，可保持

它们上面的电压为 $V_{idc}/2$ 电压不变，无论负荷大小如何。

带中间抽头的这种拓扑结构使负荷两端的电压为 $\pm V_{idc}/2$。输出电压的直流分量为零，所以输出电压 V_{ao} 可视为实质上的交流电压。开关通断逻辑与前面相同。得到的输出电压波形如图 3-7 所示。

图 3-7a 给出了调制电压（V_C）和从调制电压 V_C 采得的三角波（V_T）。以 V_T 的频率通过与 V_C 比较产生的输出电压如图 3-7b 所示，V_{ao} 是输出 PWM 电压波，其基波分量如图 3-7b 所示。

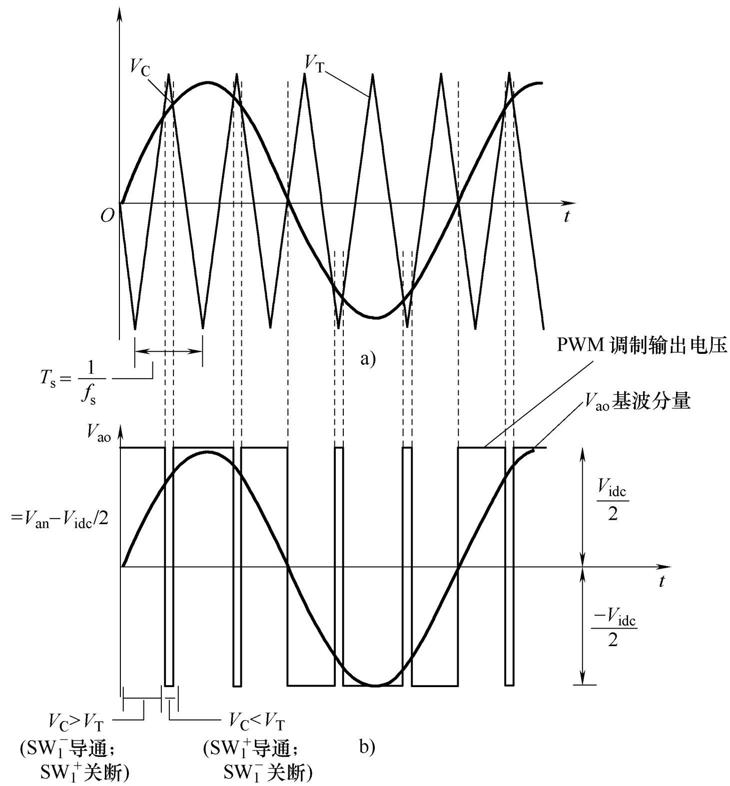


图 3-7　负荷接到电容器中间抽头，带两开关的单相逆变器正弦 PWM 输出波形

两个开关管的开关逻辑是：

1）如果 $V_C > V_T$，SW_1^+ 导通；SW_1^- 关断，$V_{an} = +V_{idc}/2$；

2）如果 $V_C < V_T$，SW_1^- 导通；SW_1^+ 关断，$V_{an} = -V_{idc}/2$。

输出电压的基波分量可通过正弦调制电压幅值的变化而改变。图 3-8 给出了正弦波峰值降低的调制电压波形。

图 3-8a 给出了调制电压（V_C）和从调制电压 V_C 采得的三角波（V_T）。但此处的调制电压幅值是图 3-7 中调制电压的一半。以 V_T 的频率与 V_C 比较产生的输出电压如图 3-8b 所示。V_{ao} 是输出 PWM 波，其基波分量如图 3-8b 所示。PWM 输出电

压的幅值也是图 3-7b 中电压幅值的一半。

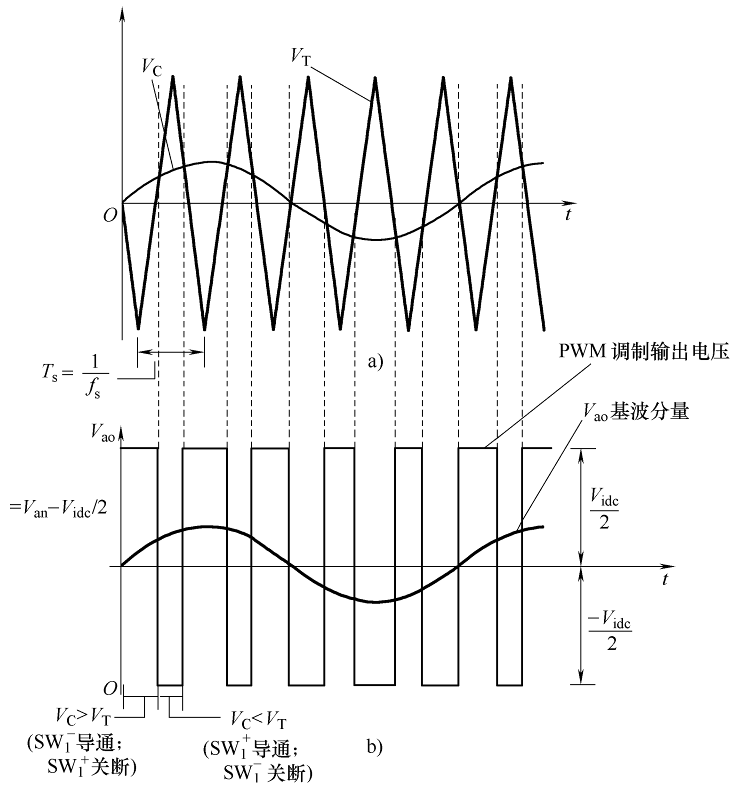


图 3-8 正弦波幅值减小的带两电容器单相半桥 DC/AC 逆变器 PWM 输出波形

采用这种拓扑的输出电压没有直流分量。输出的 PWM 电压是与调制频率相同的基波正弦电压和谐波，即

$$V_{an}=\frac{V_{idc}}{2}M_a\cdot\sin\omega_e t+\text{谐波} \tag{3-4}$$

式中，$\omega_e=2\pi\cdot f_e$，ω_e 为正弦波角频率（rad/s），f_e 为正弦波频率（Hz）。$0\leqslant M_a\leqslant 1$ 时，输出基波电压的幅值与调制指数为线性关系。M_a 大于 1 时，会进入非线性区域，随着调制指数的增大，输出基波电压幅值最大到$\frac{4}{\pi}\cdot\frac{V_{idc}}{2}$，随后不再随 M_a 增大。

输出电压的基频与正弦电压的频率相同。因此，调节正弦电压的峰值可以改变输出电压的幅值。同样，改变正弦波的频率也可以使输出频率改变。

从电能质量的角度考虑，逆变器的输出电压应尽可能接近正弦波，尽量减少谐波含量。为减少谐波失真，相对于调制频率，应尽可能增大三角波频率。要测量开关频率提高的作用，可增大调频指数。调频指数 M_f 为定义为

$$M_f = \frac{f_s}{f_e} \tag{3-5}$$

式中，f_s 为三角波频率，f_e 为正弦调制频率。

输出电压的谐波含量由调频指数决定。调制比为 0.6 时，不同调频指数下相对于基波的谐波含量见表 3-1。

表 3-1　M_a 为 0.6 不变，不同 M_f 下的输出电压谐波含量

谐波次数	$M_f=3$ (%)	$M_f=5$ (%)	$M_f=7$ (%)	$M_f=9$ (%)
1	100	100	100	100
3	163	22	0.42	0.05
5	61	168	22	0.38
7	73	25	168	22
9	37	62	22	168

表 3-1 的第一列为谐波次数。美国的电网频率是 60Hz，因此基波频率是 60Hz。3 次谐波频率是基波频率的 3 倍，为 180Hz。类似地，5 次、7 次和 9 次谐波频率分别是 300Hz、420Hz 和 540Hz。表 3-1 的后四列给出了谐波含量占基波电压的百分比。各次谐波含量与 M_f 直接相关。当 M_f 为 3 时，3 次谐波是基波电压的 163%。当 M_f 分别为 5、7 和 9 时，5 次、7 次和 9 次谐波含量都超过 100%。当 M_f 为 9 时，3 次和 5 次谐波几乎不存在（0.05% 和 0.38%），此时 7 次和 9 次谐波含量较大。随着 M_f 增大，基波含量大的谐波次数也增大。逆变器负载一般为感性，可起到低通滤波作用，故高次谐波可通过感性负载滤除，但低次谐波不能。若 M_f 较高，输出电压的低次谐波含量很小而高次谐波可被滤除，输出接近正弦波。因此 M_f 应尽量高，以减少负载电流的谐波含量。但另一方面，开关频率增高会加大开关损耗。因此，需要在开关损耗、可听噪声和谐波畸变三者之间做出权衡，寻求最佳方案。

图 3-9 是 M_f 增大到 13 时单相半桥逆变器的输出波形。三角波频率为 780Hz，是电网频率的 13 倍。从图 3-9 波形中可以看出在一个特性周期开关开通和关断的状态。开关频率升高会增大开关损耗，从而影响逆变器效率。

图 3-10 显示了当负载为感性时（电流滞后于电压），开关开通电压输出和电流流向的详细过程。流过开关的电流与电流方向和开关通断状态有关。当 V_C 大于 V_T 时，SW_1^+ 导通，但不能流过负电流。此时，电流流过二极管 D_1^+（见图 3-10a），a 点电位等于直流正母线电位，因而 D_1^- 反向偏置。此为图 3-10a 区域 1 的状态。随后，若 V_C 仍大于 V_T，电流变为正，SW_1^+ 仍然导通，电流流过 SW_1^+，如图 3-10b 所示。这时，SW_1^+ 两端上的阻性电压降会使 D_1^+ 保持反向偏置并关断，此时 D_1^- 由于 a 点的直流母线正极电压而被反偏。此为图 3-10b 区域 2 的状态。流过开关管 SW_1^+ 的电流为正，流过二极管 D_1^+ 的电流为负。因此，可认为开关可流过正负两

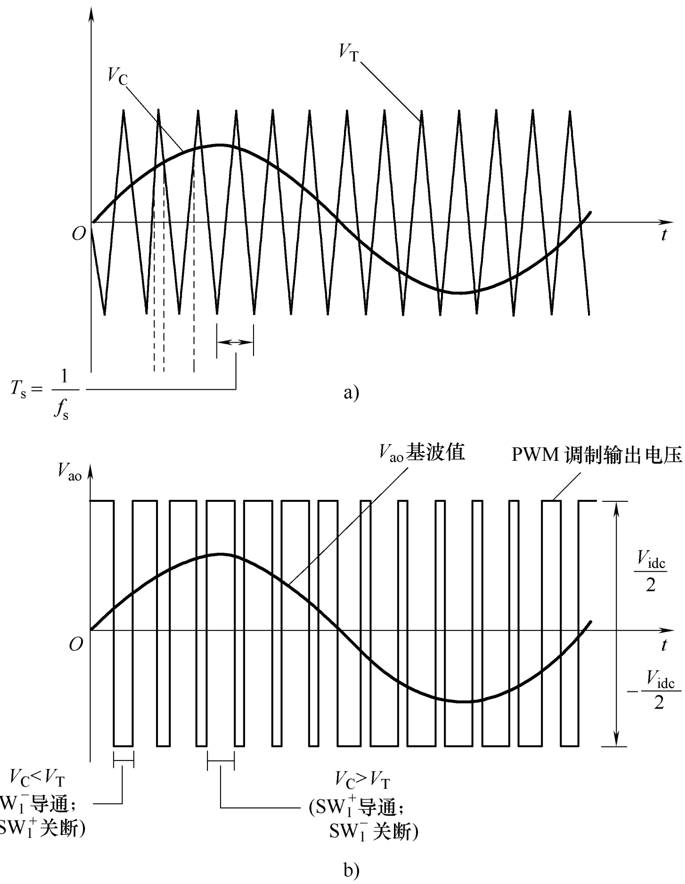
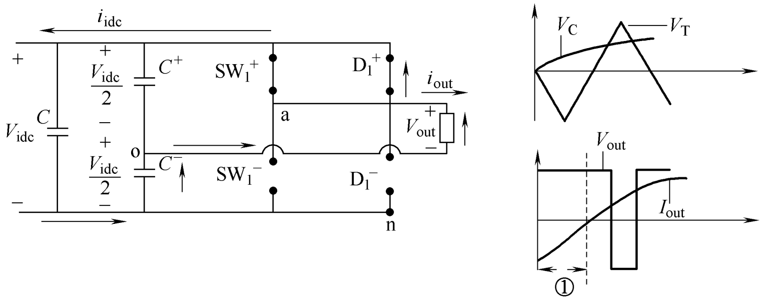


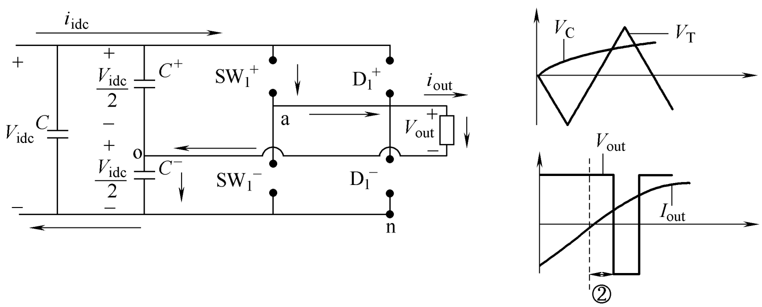
图 3-9　M_f 为 13 时单相半桥 DC/AC 逆变器输出波形

个方向的电流。但哪个开关导通电流由脉冲控制信号和电流方向决定。当 V_C 小于 V_T 时，SW_1^- 导通。此时若电流仍为正，则流过 D_1^-。a 点电位等于直流负母线电压，此电压使 D_1^+ 反偏。这是图 3-10c 区域 3 的状态。最后一个区域，即图 3-10d 的区域 4，输出电流为负。在此区域，电流流过 SW_1^-，a 点电位仍等于直流负母线电压。流过 SW_1^- 两端的电流产生的小阻性电压降会使 D_1^- 保持反向偏置，D_1^- 关断。同时 D_1^+ 由于 a 点等于直流负母线电压而被反偏。电流方向不同时流通的路径如图 3-10a ~ d 所示。

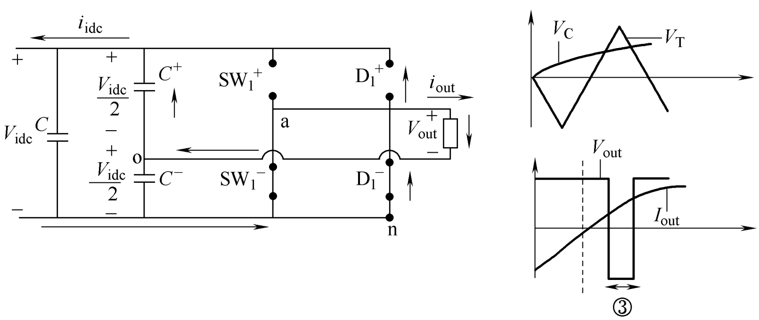
例 3.1　一单相半桥逆变器由两电容中间抽头与负荷连接，直流侧为 380V 光伏电源。逆变器输出 60Hz 交流。设置开关频率为 420Hz（$M_f = 7$），调制比 M_a 为 0.9。请将逆变器输出波形用 MATLAB M 文件语言写出，包括正弦波、三角波和输出电压 V_{ao}。



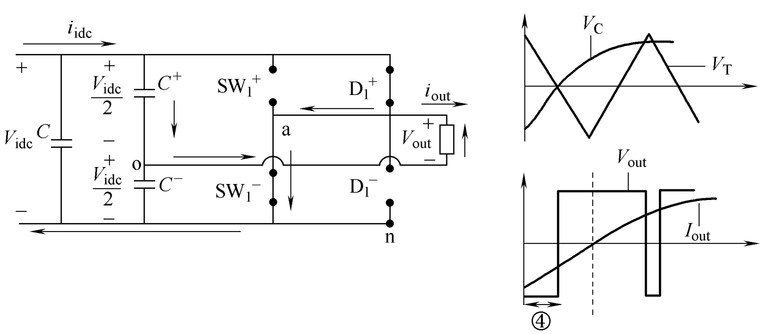
a) SW_1^+导通，SW_1^-关断，D_1^+通流，$V_{ao}=+V_{idc}/2, i_{out}<0$



b) SW_1^+导通通流，SW_1^-关断，$V_{ao}=+V_{idc}/2, i_{out}>0$



c) SW_1^-导通，SW_1^+关断，D_1^-通流，$V_{ao}=-V_{idc}/2, i_{out}>0$



d) SW_1^-导通通流，SW_1^+关断，$V_{ao}=-V_{idc}/2, i_{out}<0$

图 3-10　单相半桥逆变器不同运行状态下的等效电路

解

编写程序的步骤如下：

1）给直流输入电压（V_{dc}）、三角波电压 $V_T(t)$ 和调制电压 V_C 的峰值(分别是 $V_{T(max)}$ 和 $V_{C(max)}$）赋值。

2）设置 $V_T(t)$ 和 V_C 的频率（分别是 f_T 和 f_C）。

3）V_T 的周期 T_s 由频率 f_T 的倒数计算。

4）用 For 循环将 k 以 $T_s/500$ 的步长从 0 增大到 2/60（两个工频周波），画出 V_T、V_C 和 V_o。

5）V_T 由直线公式确定。

6）在画完一个周期的波形后，再平移整数周期，逐步画出整个时间区间的波形。

7）V_T 用黑色线表示，表示为 plot(k，V_T，“k”)，其中“k”表示黑色。

8）V_C 用红色线表示，表示为 plot(k，V_C，“r”)，其中“r”表示红色（V_T 和 V_C 在一个坐标轴上画出）。

9）V_o 由 V_T和 V_C 的大小决定，若 $V_C > V_T$，则 $V_{an} = V_{idc}/2$；否则，$V_{an} = -V_{idc}/2$。

10）画出 V_o 偏移 −500 的波形，并用蓝色线，用“b”表示：plot(k， −500 + V_{an_new}，“b”)。

11）V_T 和 V_C 相交的点是 V_o 的不连续点。保持 x 轴恒定不变，y 轴变化，选用适当的颜色和限值，用循环（loop）画出实线和虚线。

MATLAB 程序的运行结果如图 3-11 所示。

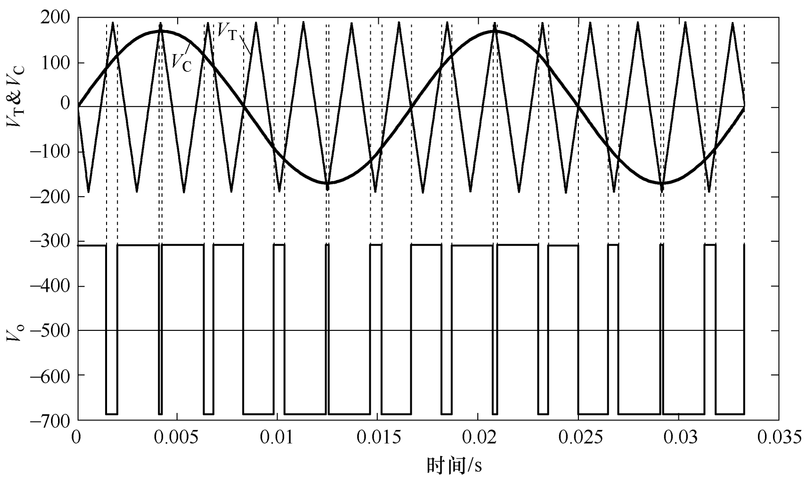


图 3-11 用 MATLAB 画出的单相半桥逆变器开关的 PWM 波形

带两个开关管的单相逆变器用两个电容以得到中间抽头，这会增大逆变器体积。同时，采用此种拓扑的开关管两端承受的电压为直流母线电压，但输出端的负

载电压最大仅为直流电压的一半。因此，两个开关不能充分利用。可采用 4 个开关管，以增大输出电压。这种逆变器拓扑将在下节介绍[1-5]。

3.3　单相四开关双极全桥逆变器

本节介绍的逆变器由两个支路构成。每个支路有两个可控开关且每个开关可通过触发脉冲导通。每个支路的工作原理与前述单相半桥逆变器相同。图 3-12 中 SW_1^+ 和 SW_2^-、SW_1^- 和 SW_2^+ 为两组开关。这种拓扑可以使负载电压在 $+V_{idc}$ 和 $-V_{idc}$ 之间变化，是半桥逆变电路的两倍。这使得输出电压提高，逆变器容量增大。SW_1^+ 和 SW_2^- 导通时，负载两端的电压是 a 点和 b 点间的电位差，此时为 $+V_{idc}$。当 SW_2^+ 和 SW_1^- 导通时，负载两端的电压是为 $-V_{idc}$。施加如图 3-13 所示的正弦 PWM 时，输出电压基波分量的峰值为

$$V_{o,1}=V_{idc}M_a \tag{3-6}$$

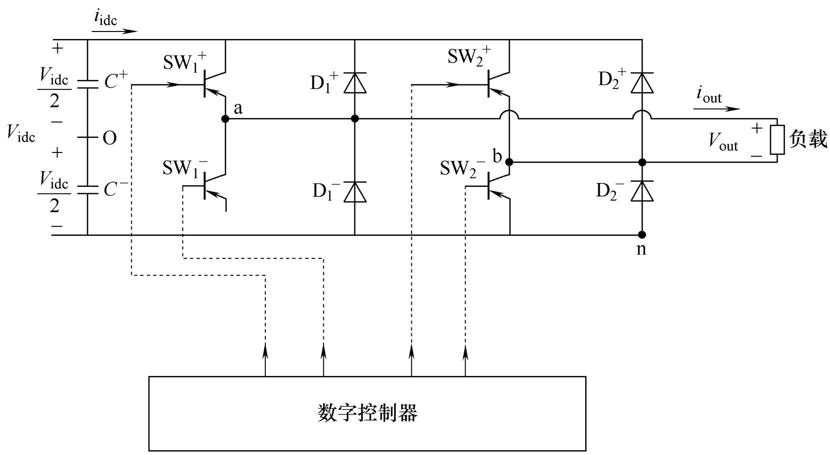


图 3-12　单相四开关逆变器

开关通断的逻辑与半桥电路类似。若 $V_C>V_T$，SW_1^+ 和 SW_2^- 导通，其他开关关断，使 V_{an} 等于 V_{idc}，V_{bn} 等于 0，输出电压 $V_{ab}(=V_{an}-V_{bn})$ 为 $+V_{idc}$。当 $V_C<V_T$ 时，SW_1^- 和 SW_2^+ 导通，V_{an} 等于 0，V_{bn} 等于 V_{idc}，输出电压 $V_{ab}(=V_{an}-V_{bn})$ 为 $-V_{idc}$。因此输出电压在 $+V_{idc}$ 和 $-V_{idc}$ 之间变化，如图 3-13 所示。这种调制技术称为双极性正弦 PWM 控制方式，输出的 PWM 波在正负值之间跳变。

对于双极性输出电压波形，开关逻辑如下：

1）如果 $V_C>V_T$，SW_1^+ 和 SW_2^- 导通；其他开关关断，$V_{ab}=V_{idc}$；

2）如果 $V_C<V_T$，SW_1^- 和 SW_2^+ 导通，其他开关关断，$V_{ab}=-V_{idc}$。

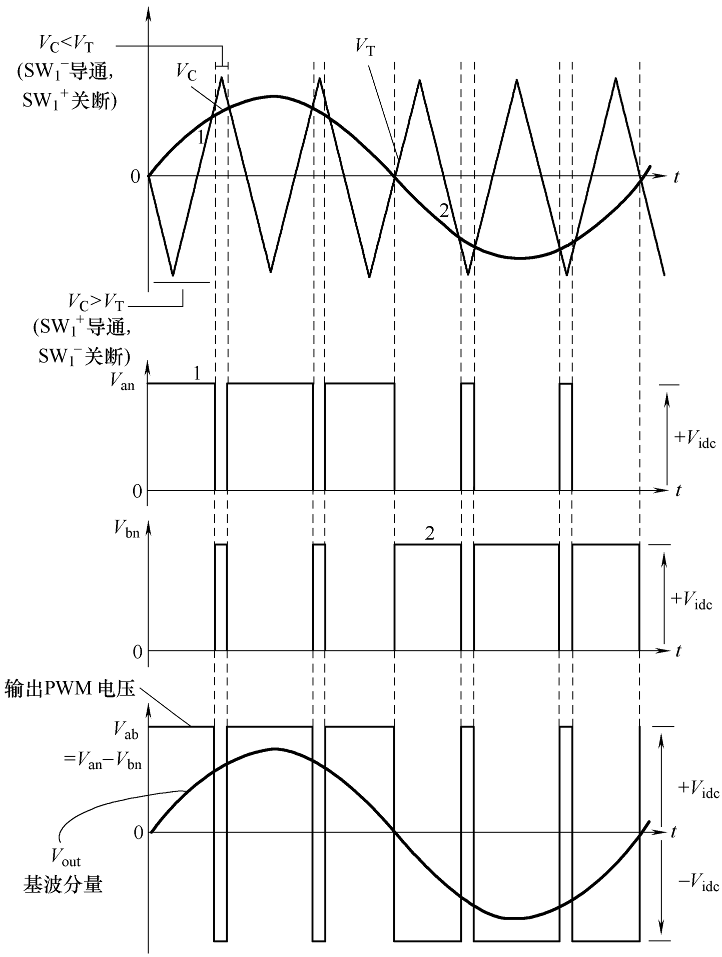


图 3-13 双极性逆变电路电压波形

图 3-14 显示了开关动作的时序和不同开关器件导通的电流流向和输出电压。

此时的输出电压为

$$V_{ao} = V_{idc} M_a \cdot \sin\omega_e t + \text{谐波} \tag{3-7}$$

式中，$\omega_e = 2\pi \cdot f_e$，$\omega_e$ 为正弦波的角频率（rad/s）；f_e 为正弦波频率（Hz）。

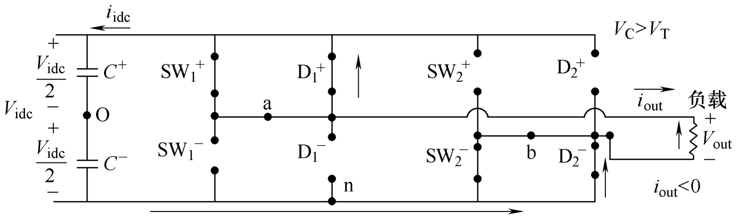
基频分量的峰值是 $V_{idc}M_a$，其中 $0 \leqslant M_a \leqslant 1$。此时基波电压的幅值与调制比为线性关系，当 M_a 大于 1，会进入非线性区域，随着调制比的增大，输出基波电压最大饱和幅值为$\frac{4}{\pi} \cdot V_{idc}$，随后不再随 M_a 增大。

因为状态变换时总是从负的直流电压直接变为正的直流电压，所以开关动作使输出电压在正、负直流电压间来回跳变，这称为双极性正弦 PWM 调制。

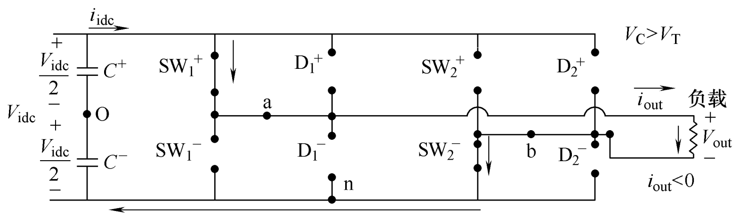
这种调制方式的输出电压谐波含量与半桥逆变器相同（见表 3-1），不同点仅

是直流电压偏移量为零。

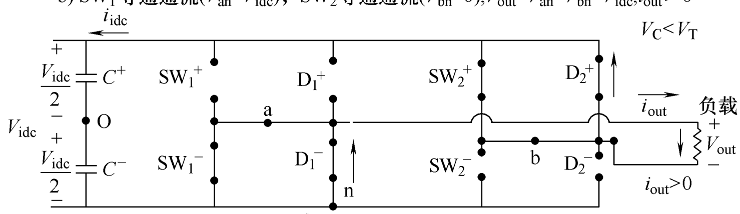
与半桥逆变电路类似，基波分量的幅值由调制比 M_a（$M_a = V_{C(max)}/V_{T(max)}$）决定。可通过增大调频指数（$M_f = f_s/f_e$）降低谐波含量[1-5]。



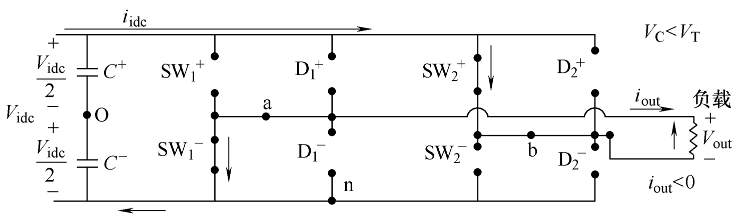
a) SW_1^+导通，D_1^+导通通流($V_{an}=V_{idc}$)；SW_2^-导通，D_2^-导通通流($V_{bn}=0$), $V_{out}=V_{an}-V_{bn}=V_{idc}$,$i_{out}<0$



b) SW_1^+导通通流($V_{an}=V_{idc}$)；SW_2^-导通通流($V_{bn}=0$),$V_{out}=V_{an}-V_{bn}=V_{idc}$,$i_{out}>0$



c) SW_1^-导通，D_1^-导通通流($V_{bn}=0$)；SW_2^+导通,D_2^+导通通流($V_{bn}=V_{idc}$)，$V_{out}=V_{an}-V_{bn}=-V_{idc}$,$i_{out}>0$



d) SW_1^-导通通流($V_{an}=0$)；SW_2^+导通通流($V_{bn}=V_{idc}$)，$V_{out}=V_{an}-V_{bn}=-V_{idc}$,$i_{out}<0$

图 3-14　单相全桥逆变器开关管状态示意图

3.3.1　单极性单相全桥逆变器的 PWM

采用双极性 PWM 调制方式输出的 PWM 波形在 $+V_{idc}$ 和 $-V_{idc}$ 间跳变。因此负荷会承受较高的电压波动，负荷绝缘也因此会受到高应力作用。采用单极性调试方式的输出电压在 $+V_{idc}$ 和 0，或 $-V_{idc}$ 和 0 间跳变，开关逻辑与单相半桥逆变电路相同，但两个支路采用两个不同的正弦波分别调制。在控制一个支路的调制电压 V_C 幅值大于 V_T 时，这个支路的上部开关导通，另一支路的开关逻辑相同，但其正弦

调制波与前一支路的调制波相位相差 180°。图 3-15 是采用这种调制方式得到的电压波形。

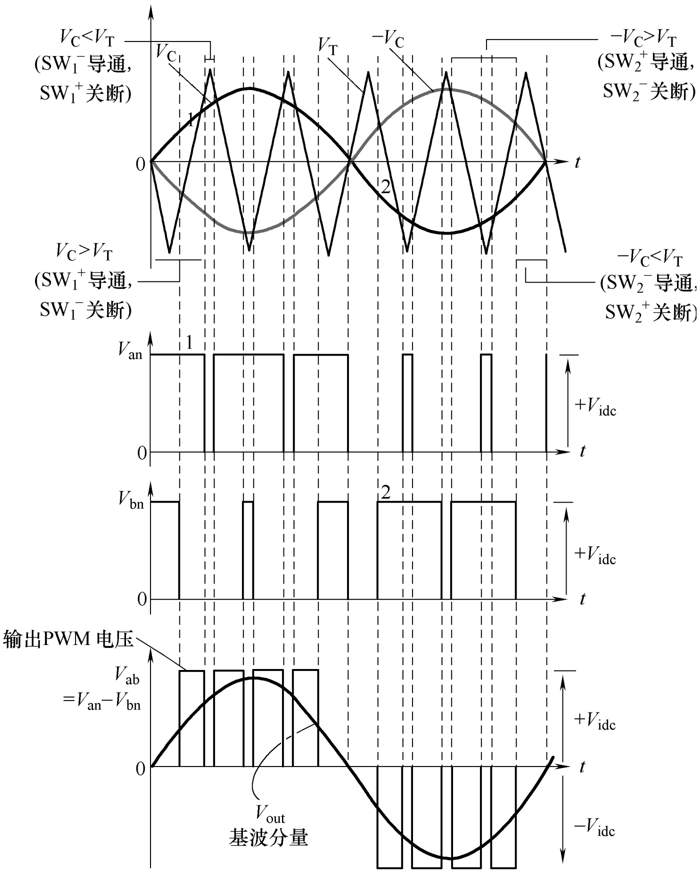


图 3-15　单极性单相逆变电路电压波形（调频指数为 5）

单极性调制方式的开关逻辑为

若 $V_C>V_T$ 且 $-V_C<V_T$：SW_1^+ 和 SW_2^- 导通；其他开关关断，$V_{ab}=V_{idc}$。

若 $V_C<V_T$ 且 $-V_C<V_T$：SW_1^- 和 SW_2^- 导通，其他开关关断，$V_{ab}=0$。

若 $V_C<V_T$ 且 $-V_C>V_T$：SW_1^- 和 SW_2^+ 导通；其他开关关断，$V_{ab}=-V_{idc}$。

若 $V_C>V_T$ 且 $-V_C>V_T$：SW_1^+ 和 SW_2^+ 导通，其他开关关断，$V_{ab}=0$。

输出电压为

$$V_{ao}=V_{idc}M_a\cdot\sin\omega_e t+\text{谐波} \tag{3-8}$$

式中，$\omega_e=2\pi\cdot f_e$，ω_e 为正弦波的角频率（rad/s）；f_e 为正弦波频率（Hz）。因此基频分量的峰值是 $V_{idc}M_a$，其中 $0\leqslant M_a\leqslant 1$。此时输出基波电压的幅值与调制比为线性关系，当 M_a 大于 1 时，会进入非线性区域，随着调制比的增大，输出基波电

压幅值饱和，最大到$\frac{4}{\pi} \cdot V_{\mathrm{idc}}$，随后不再随 M_a 增大。

与其他逆变电路类似，输出电压的频率和幅值由正弦调制波决定，输出电压的谐波量由调频指数决定。

例 3.2　一个 60V 光伏电源，用单相四开关逆变器，采用单极性调制方式将直流转换成 50Hz 交流。假如 M_a 为 0.5，M_f 为 7。请编写 MATLAB 程序生成逆变器的控制电压和输出电压波形。

解

以下为生成的波形。

与表 3-1 类似，表 3-2 列出了采用单极性调试方式的输出电压谐波含量。从表中可以看出，调频指数大于 5 时，基本没有低次谐波。输出电压中的高次谐波一般不需要考虑，因为感性负载的低通滤波性能可将高次谐波滤除。因此，单极性调制方式具有降低谐波含量，减少负荷电压波形的作用。开关的动作次数与双极性调制方式相同[1-5]。结果如图 3-16 所示。

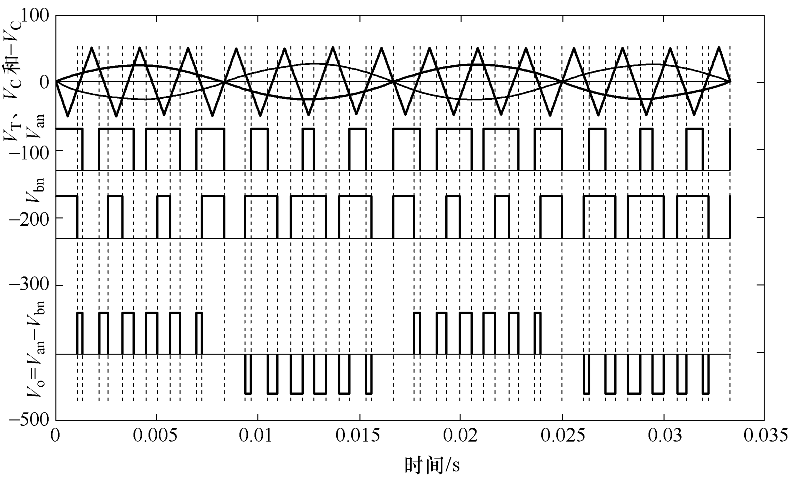


图 3-16　用 MATLAB 画出的单相全桥逆变电路单极性调制开关方式

表 3-2　M_a 为 0.6 时，不同 M_f 下单极性调制方式的输出电压谐波含量

谐波次数	$M_f=3$ (%)	$M_f=5$ (%)	$M_f=7$ (%)	$M_f=9$ (%)
1	100	100	100	100
3	12	0.01	0.01	0.01
5	61	0.55	0.01	0.03
7	67	12	0.03	0.02
9	33	62	0.58	0.01

3.4　三相 DC/AC 逆变电路

三相逆变电路有 3 个支路，每相一个支路，如图 3-17 所示。每个支路可视为单相逆变电路[2-3]。每个支路的输出电压 V_{an}、V_{bn}、V_{cn} 由输入电压 V_{idc} 和开关状态决定，其中 n 点为直流电压的负极。逆变器有 3 个端子，两个输入和一个输出。输入功率的可以是蓄电池、光伏电池、燃料电池或高速发电机、变速风电机组等绿色能源的直流电源。正弦波信号输入到数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）的控制器来控制输出交流电压、功率和频率。DSP 控制器发出开关量信号控制 6 个电力开关管产生想要的交流电[1-5]。

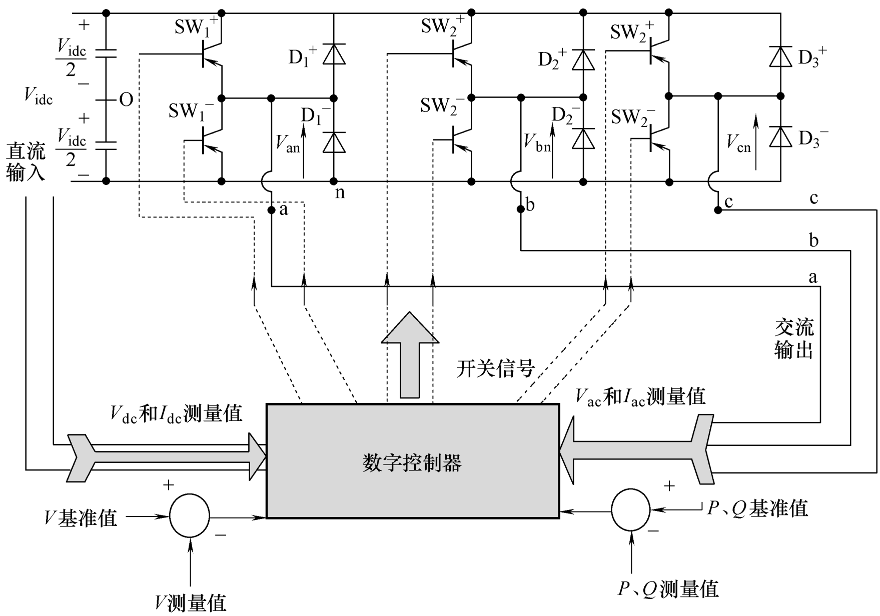


图 3-17　三相逆变电路运行示意图

3.5　PWM 控制方法

3.5.1　三角波法

三角波可以用线性方程模拟。

直线可以表示为

$$Y = mx + b \tag{3-9}$$

式中，b 是 Y 轴截距，m 是斜率。图 3-18 所示直线的 Y 轴截距为 0。斜率可用下式计算：

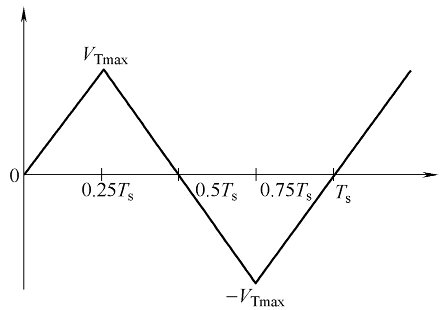


图 3-18　三角波波形

$$\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}=\frac{V_{\mathrm{Tmax}}-0}{0.25T_s-0} \tag{3-10}$$

因此，对于 $0<x\leqslant\frac{T_s}{4}$，有

$$Y=\frac{V_{\mathrm{Tmax}}x}{0.25T_s} \tag{3-11}$$

式中，x 为时间，Y 为三角波幅值。可以对每个线段重复这个过程。

$$m=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}=\frac{0-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.5T_s-0.25T_s}，对于\frac{T_s}{4}<x\leqslant\frac{T_s}{2} \tag{3-12}$$

斜率 m 可表示为

$$m=\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s} \tag{3-13}$$

$$b=Y-m\cdot x,故\ b=V_{\mathrm{Tmax}}-\left(\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}\right)\cdot 0.25T_s \tag{3-14}$$

$$Y=\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}\cdot x+\left[V_{\mathrm{Tmax}}-\left(\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}\right)\cdot 0.25T_s\right] \tag{3-15}$$

$\frac{T_s}{2}<x\leqslant\frac{3T_s}{4}$时，斜率 m 可表示为

$$m=\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}-0}{0.75T_s-0.5T_s}=\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s} \tag{3-16}$$

$$b=0-\left[\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}\right]0.5T_s=\frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}0.5T_s \tag{3-17}$$

$$Y=\frac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}\cdot x+\left[\frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}0.5T_s\right] \tag{3-18}$$

$\frac{3T_s}{4}<x\leqslant T_s$ 时，斜率 m 可表示为

$$m=\frac{0-(-V_{\mathrm{Tmax}})}{T_s-0.75T_s}=\frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s} \tag{3-19}$$

$$b = -V_{\mathrm{Tmax}} - \frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}0.75T_s \tag{3-20}$$

因此这个时段的直线方程是

$$Y = \frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s} \cdot x + \left[-V_{\mathrm{Tmax}} - \frac{V_{\mathrm{Tmax}}}{0.25T_s}0.75T_s\right] \tag{3-21}$$

由以上公式得到期望频率为 f_s 的三角波一个完整周期的波形。这些公式可编入 MATLAB 来输出波形。每个三角波周期的 MATLAB 计算指令如下：

$$t_1 = 0:\text{Step size}:T_s/4 \tag{3-22}$$

$$t_2 = \frac{T_s}{4} + \text{Step size}:\text{Step size}:T_s/2 \tag{3-23}$$

$$t_3 = T_s/2 + \text{Step size}:\text{Step size}:3T_s/4 \tag{3-24}$$

$$t_4 = 3T_s/4 + \text{Step size}:\text{Step size}:T_s \tag{3-25}$$

式中，Step size 是自定义步长，但应在合理范围内设置较小值。用 MATLAB 模拟单相逆变器的运行，需将以上数据组合成以下的行矩阵。

$$\text{Time} = [t_1 \quad t_2 \quad t_3 \quad t_4]$$

可以用如下矩阵形式定义直线方程。一个周期的三角波可以分成式（3-22）~式（3-25）所示的 4 个时段。

线段 1：$\dfrac{V_{\mathrm{Tmax}} \cdot t_1}{T_s/4}$

线段 2：$\dfrac{-V_{\mathrm{Tmax}} \cdot t_2}{T_s/4} + \left[V_{\mathrm{Tmax}} - \left(\dfrac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{T_s/4}\right) \cdot T_s/4\right]$

线段 3：$\dfrac{-V_{\mathrm{Tmax}} \cdot t_3}{T_s/4} + \dfrac{-V_{\mathrm{Tmax}}}{T_s/4}T_s/2$

线段 4：$\dfrac{V_{\mathrm{Tmax}} \cdot t_4}{T_s/4} + \left[-V_{\mathrm{Tmax}} - \dfrac{V_{\mathrm{Tmax}}}{T_s/4} \cdot 3T_s/4\right]$

MATLAB 指令可以写为

FullLine = ［Line1 Line2 Line3 Line4］

则三角波可用 MATLAB 指令画出：

plot（Time，FullLine）

以上 MATLAB 程序仅画出一个三角波周期的波形，不能完全显示逆变器的运行。可在一个三角波周期完成后，从 $t=0$ 处重复执行，画出完整波形[1-5]。

例 3.3 一单相全桥逆变器，交流端子输出容量为 2kW，电压为 120V、频率为 60Hz。直流侧由 600V 光伏电源供电。实际采样频率一般在 5kHz 或 20kHz 以上，以避开听力敏感的音频范围。此例中选取的频率很低，以便显示波形。假定开关频率为 420Hz，调制比 M_a 为 0.9。试设置仿真步长，并用三角波方法编写 MATLAB 程序。

主要步骤：

1）设置直流电压（V_{dc}）、$V_T(t)$ 和正弦波 V_C 的峰值（V_{Tmax}和 V_{Cmax}）。

2）设定 $V_T(t)$ 的频率为 f_s，V_C 的频率为 f_C。

3）V_T 的周期 T_s 由用频率 f_S 的倒数计算。

4）用 For 循环将 k 以 $T_s/500$ 的步长从 0 增大到 2/60（两个工频周波），画出 V_T、V_C 和 V_o。

5）V_T 采用三角波方法用线性方程画出。

在 $0\leqslant\left(\frac{k}{T_s}\right)余数<\frac{T_s}{4}$时，$V_T=-V_{Tmax}\frac{\left(\frac{k}{T_s}\right)余数}{T_s/4}$

在$\frac{T_s}{4}\leqslant\left(\frac{k}{T_s}\right)余数<\frac{3T_s}{4}$时，$V_T=-V_{Tmax}\frac{\left(\frac{k}{T_s}\right)余数-0.5T_s}{T_s/4}$

在$\frac{3T_s}{4}\leqslant\left(\frac{k}{T_s}\right)余数<T_s$ 时，$V_T=-V_{Tmax}\frac{\left(\frac{k}{T_s}\right)余数-T_s}{T_s/4}$

6）在画完一个周期的波形后，平移一个周期，以此逐步画出整个时间区间的波形。

7）V_T 用黑色线表示，表示为 plot（k，V_T，“k”），其中“k”表示黑色。

8）V_C 用红色线表示，表示为 plot（k，V_C，“r”），其中“r”表示红色（V_T 和 V_C 在一个坐标轴上画出）。

9）V_o 由 V_T 和 V_C 的大小决定，若 $V_C>V_T$，$V_{an}=V_{dc}$；否则，$V_{an}=-V_{dc}$。

10）画出 V_o 偏移 −500 的波形，并用蓝色线，用“b”表示：plot（k，−500 + V_{an_new}，“b”）。

11）V_T 和 V_C 相交的点是 V_o 的不连续点。保持 x 轴恒定不变，y 轴变化，选用适当的颜色和限值，用循环（loop）画出实线和虚线。

MATLAB 程序如下：

```
MATLAB Program
VCMax=120*sqrt(2);          %maximum value of VC
VTMax=VCMax/0.9;            %maximum value of VT
Vdc=VTMax;                  %input dc value
fC=60;                      %frequency of VC
fT=420;                     %frequency of VT
Ts=1/fT;                    %time period of VT
Vo_new=0;
for k=0:Ts/500:2/60         % to plot from 0 to 0.04 sec
                            in steps of Ts/500
  plot (k,0,'k');
  plot (k,-500,'k');        % the 2 time-axes are plotted
```

```
                              at different offsets
if(rem(k,Ts)<Ts/4)            % VT is defined using
                              equations of line
  VT=-VTMax*rem(k,Ts)/0.25/Ts;
elseif(rem(k,Ts)>=Ts/4 && rem(k,Ts)<3*Ts/4)
  VT=VTMax*(rem(k,Ts)-0.5*Ts)/0.25/Ts;
else
  VT=-VTMax*(rem(k,Ts)-Ts)/0.25/Ts;
end                           %VT is defined using
                              identity mapping
VC=VCMax*sin(2*pi*fC*k); % VC is defined
plot (k,VT,'k');              %VT is plotted in black ('k')
hold on
plot (k,VC,'r');              %VC is plotted in red ('r')
                              on the same axis as VT
  hold on
 %ploting Von
  if (VC>VT) %Vo is decided depending on VC>VT and
 value assigned in Vo_new
    Vo_old=Vo_new;
    Vo_new=Vdc;
  else
    Vo_old=Vo_new;
    Vo_new=-Vdc;
  end
  plot (k,-500+Vo_new,'b');          %Van is plotted in
                                     blue ('b') with offset
                                     of -500
  hold on
  if(Vo_new ~= Vo_old)               %The points of
                                     discontinuity in Van
                                     are found out
    for j = -500-Vdc:30:VTMax        %dotted lines plotted
      plot (k,j);
      hold on
    end
    for j = -500-Vdc:.2:-500+Vdc  %continuous lines
                                     plotted between the
                                     upper & lower lines
                                     %of Vo=Va - Vb
      plot (k,j);
      hold on
    end
  end
end
```

图 3-19 为采用此方法仿真得出的结果。

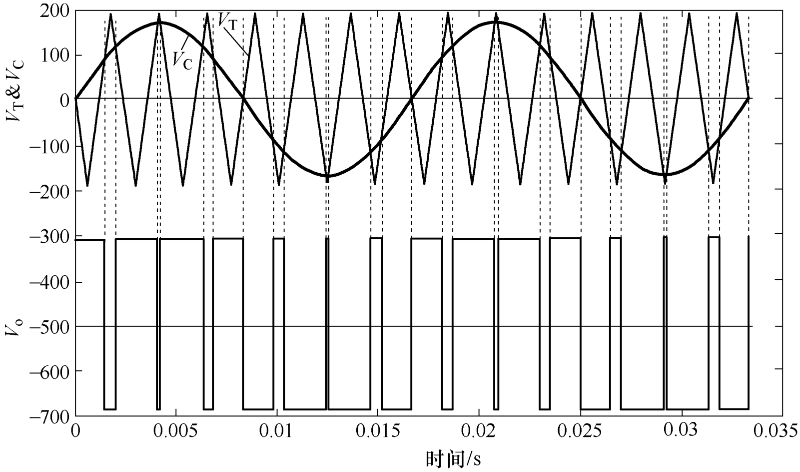


图 3-19 采用三角波方法的线性方程画出的 $V_T(t)$、$V_C(t)$ 和 V_o 波形

3.5.2 恒等式法

采用恒等式法，以自变量为 x 的因变量，赋值仍为 x。如果 $y(x)$ 等于 x，则如果

$$\begin{aligned} x&=1,\text{则 } y=1,\\ x&=2,\text{则 } y=2 \end{aligned} \tag{3-26}$$

采用这个方法表示的三角波方程为

$$F(x)=\arcsin(\sin x) \tag{3-27}$$

把任意数值带入 x，都可以得到 $F(x)=x$。因此，随着正弦波的传播，以正弦值变化，而反正弦函数 arcsin 使 $F(x)$ 看起来不像是正弦波，而像是三角波。由于 MATLAB 中角度单位是弧度，故方程需乘以 $2/\pi$。反正弦函数峰值为 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$，因此

$$F(x)=A\cdot\frac{2}{\pi}\arcsin(\sin x) \tag{3-28}$$

例 3.4 用恒等式法画出例 3.3 中的三角波。

解

采用的步骤与三角波法相同。唯一不同是 V_T 的定义：

$V_T=V_{Tmax}\cdot\dfrac{2}{\pi}\arcsin(\sin(2\pi\cdot f_s\cdot t))$。结果与三角波法相同。

3.6 三相逆变器分析

三相逆变器有 6 个开关管和 6 个二极管，如图 3-20 所示。每个开关管由一组

SW_i 和 D_i 组成（i=a，b，c），使电流可以双向流动。三相逆变电路在直流母线上有 3 个支路，每个支路有两组开关。上部开关导通时，输出节点（a，b，或 c）上的电压为正。相反，当下部开关导通时，输出节点电压为负。通过轮流导通上下部开关，输出节点电压在正负直流电压间跳变。

$$V_{L-L,rms}=M_a\cdot\sqrt{\frac{3}{2}}\cdot\frac{V_{idc}}{2} \tag{3-29}$$

上式可近似表示为

$$V_{L-L,rms}=0.612V_{idc}$$

式中，$V_{L-L,rms}$为输出线电压基波的方均根值。

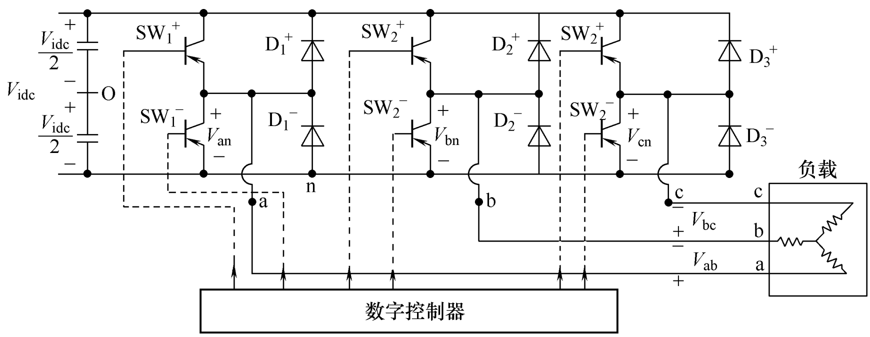


图 3-20　三相逆变器拓扑

因此，如同前述的单相逆变器，这种三相逆变器的开关频率也由三角波电压 V_T 决定，输出电压由基准调制电压 V_C 决定。三相逆变器 PWM 运行如图 3-21 所示。每个支路的调制输出电压与单相逆变器电压波形相同。调频指数决定输出电压的谐波含量。美国的工频为 60Hz，其他国家多为 50Hz。一般希望将三角波频率设置较高，使调频指数较大，以使输出电压和负荷电流中的谐波含量较小。但随着三角波频率的提高，开关频率也会提高，而开关频率高会带来高开关损耗。

还有其他因素也会影响对开关频率的选择，如开关频率高便于低通滤波器的设计。此外，如果开关频率过高，开关管有可能错误导通和关断，引起直流母线短路，损坏开关。在住宅和商用系统中，开关频率在选择上须避开听觉范围，以降低刺耳噪声。因此，在多数工程应用中，开关频率一般选在 6kHz 以下或 20kHz 以上。在多数住宅系统应用中，选取开关频率低于 6kHz。

为建立以上变换器运行的仿真模型，先用数学表达式对以上波形进行描述。

定义 a 相的调制电压 V_C 为

$$V_{C(a)}=M_a\sin(\omega_e t) \tag{3-30}$$

式中，$\omega_e=\frac{2\pi}{T_e}t$，$T_e=\frac{1}{f_e}$，$f_e$ 为调制频率，且

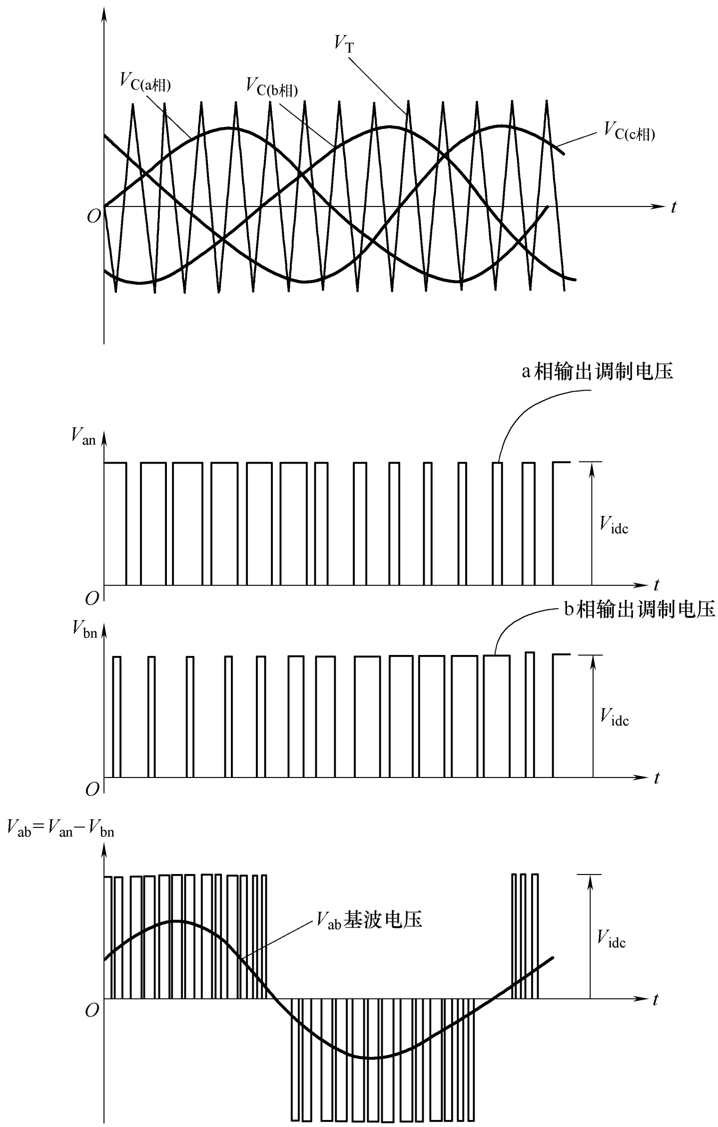


图 3-21　三相逆变器 PWM 运行

$$M_a = \frac{V_{C(\max)}}{V_{T(\max)}}$$

三角波数学表达式为

$$x_1 = -1 + \frac{T_s}{2}t \qquad \left(0 \leqslant t < \frac{T_s}{2}\right)$$

将时间 t 的单位转换为弧度，而 $f_s = M_a f_e$，上式可改写为

$$x_1 = -1 + \frac{2N}{\pi}\omega_e t \qquad \left(0 \leqslant \omega_e t < \frac{\omega_e T_s}{2}\right) \tag{3-31}$$

式中，$N=1$，2，3…。式中，M_f 可作为仿真变量。

上式可改写为

$$x_1(t) = -1 + \frac{2N}{\pi}\omega_e t \qquad \left(0 \leqslant \omega_e t < \frac{\pi}{M_f}\right)^{㊀} \tag{3-32}$$

类似地，

$$x_2(t) = 3 - \frac{2N}{\pi}\omega_e t^{㊁} \qquad \left(\frac{\pi}{N} \leqslant \omega_e t < \frac{2\pi}{M_f}\right) \tag{3-33}$$

三角波 $V_T(t)$ 可用式（3-32）和式（3-33）建模。

为建立仿真模型，令 a 相、b 相、c 相的调制电压 V_C 为

$$V_{C(a)} = M_a \sin(\omega_e t) \tag{3-34}$$

$$V_{C(b)} = M_a \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \tag{3-35}$$

$$V_{C(b)} = M_a \sin(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}) \tag{3-36}$$

且三角波 V_T（t）为

$$x_1(t) = -1 + \frac{2N}{\pi}\omega_e t \qquad \left(0 \leqslant \omega_e t < \frac{\pi}{N}\right) \tag{3-37}$$

$$x_2(t) = 3 - \frac{2N}{\pi}\omega_e t \qquad \left(\frac{\pi}{N} \leqslant \omega_e t < \frac{2\pi}{N}\right) \tag{3-38}$$

故 PWM 电压生成的步骤如下。

$$若\ V_{C(a)} \geqslant x_1(t) 或\ x_2(t)，则\ V_{an} = V_{idc} \tag{3-39}$$

类似地，

$$若\ V_{C(b)} \geqslant x_1(t) 或\ x_2(t)，则\ V_{bn} = V_{idc} \tag{3-40}$$

$$若\ V_{C(c)} \geqslant x_1(t) 或\ x_2(t)，则\ V_{cn} = V_{idc} \tag{3-41}$$

$$否则，V_{an} = 0；V_{bn} = 0；V_{cn} = 0 \tag{3-42}$$

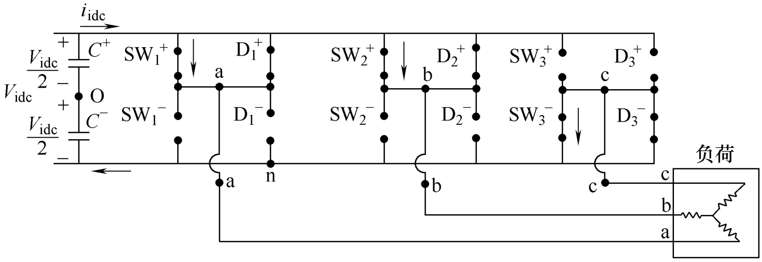
可以算得 i_{idc} 为

$$i_{idc} = i_a \times SW_1^+ + i_b \times SW_2^+ + i_c \times SW_3^+ \tag{3-43}$$

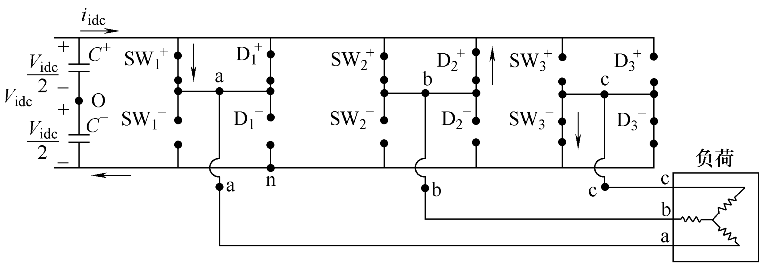
如同前述单相逆变器运行原理，三相逆变器各支路上同一时刻都只有一个开关导通。一个周波内逆变器运行的时序如图 3-22 所示。以 a 相为例，V_{an}是对于直流负极性母线的电压，由 V_{idc}、SW_1^+ 和 SW_1^- 的开关状态决定，如图 3-22a 所示。

㊀ 译者注：原书中式(3-32)写为 $0 \leqslant \omega_e < \frac{\pi}{M_f}$，有误。改为 $0 \leqslant \omega_e t < \frac{\pi}{M_f}$。

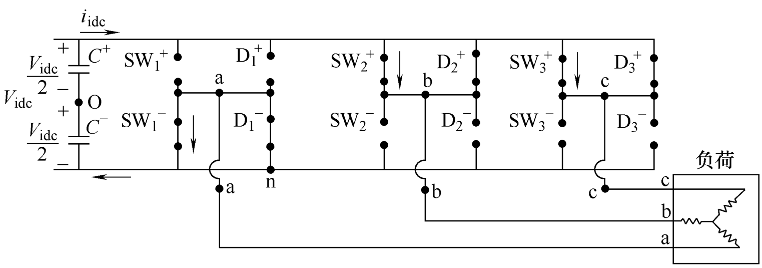
㊁ 译者注：原书中式(3-33)写为 $x_2(t) = 3 - \frac{2M_f}{\pi}\omega_e t$，有误。改为 $x_2(t) = 3 - \frac{2N}{\pi}\omega_e t$。



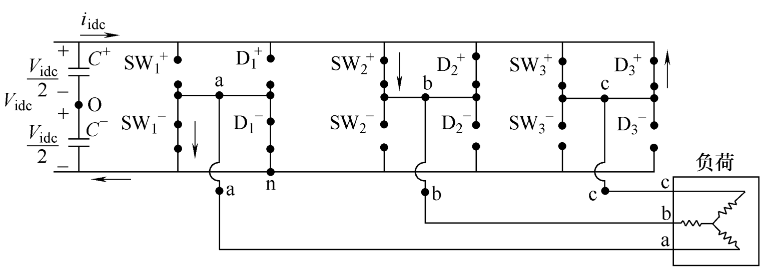
a) V_{an}, $V_{bn}=V_{idc}$, $V_{cn}=0$, I_a, $I_b>0$, $I_c<0$，SW_1^+、SW_2^+、SW_3^-导通



b) V_{an}, $V_{bn}=V_{idc}$, $V_{cn}=0$, $I_a>0$, I_b, $I_c<0$，SW_1^+、D_2^+、SW_3^-导通

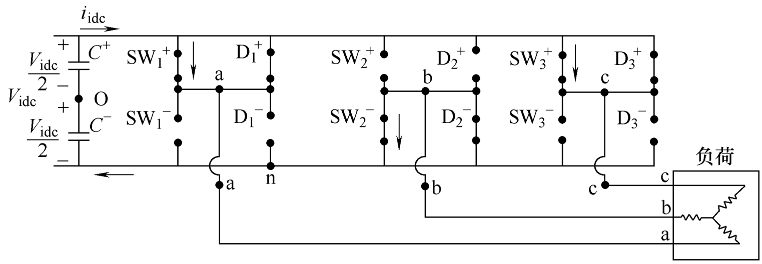


c) $V_{an}=0$, $V_{bn}=V_{cn}=V_{idc}$, $I_a<0$, I_b, $I_c>0$，SW_1^-、SW_2^+、SW_3^+导通

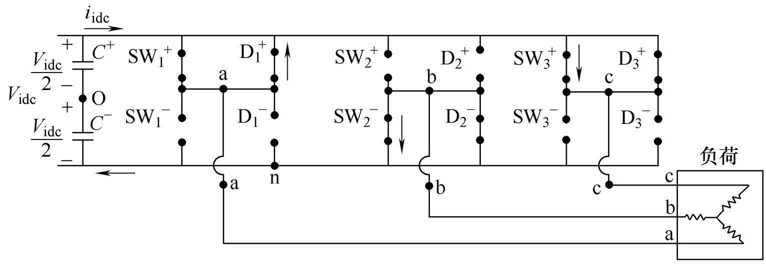


d) $V_{an}=0$, $V_{bn}=V_{cn}=V_{idc}$, I_a, $I_c<0$, $I_b>0$, SW_1^-、SW_2^+、DW_3^+导通

图 3-22　三相逆变器开关运行时序



e) $V_{an}=V_{cn}=V_{idc}$, $V_{bn}=0$, I_a, $I_c>0$, $I_b<0$, SW$_1^+$、SW$_2^-$、SW$_3^+$导通



f) $V_{an}=V_{cn}=V_{idc}$, $V_{bn}=0$, I_a, $I_b<0$, $I_c>0$, D$_1^+$、SW$_2^-$、SW$_3^+$导通

图 3-22　三相逆变器开关运行时序（续）

控制目标与已讨论的单相逆变器相同，即通过 PWM 控制每相输出调制电压，使逆变器输出电压基波分量的幅值和频率与调制电压相同。PWM 从直流母线电压采样，采集到的电压为逆变器输出电压。

例 3.5　设开关频率为 5kHz，计算所需输入直流电压的最小值。假设逆变器额定值为交流电压 207.6V，频率为 60Hz，视在功率为 100kVA。

解

$$V_{rated}=207.6\text{V},\ S=100\text{kVA},\ f=60\text{Hz}$$

逆变器交流电压为

$$V_{peak}\sin(2\pi\cdot f\cdot t)=207.6\sqrt{2}\cdot\sin(2\pi\cdot 60\cdot t)=293.59\sin(2\pi\cdot 60\cdot t)$$

式中，$V_{peak}=293.59\text{V}$。

对于三相正弦 PWM 逆变电路，线电压峰值为 $V_{L-L,peak}=M_a\cdot\sqrt{3}\cdot\frac{V_{dc}}{2}$，因此，

$$V_{dc}=\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot\frac{V_{L-L,peak}}{M_a}$$

逆变器运行于 M_a 最大值 1 时，直流电压为最小值：

$$V_{dc,min}=\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot\frac{V_{L-L,peak}}{M_{a,max}}=\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot\frac{293.59}{1}\text{V}=339.01\text{V}$$

例 3.6　考虑如下三相辐射状分布的 PV 发电系统，如图 3-23 所示。

假定负荷 1 是容量为 5kW 的三相负荷，功率因数 0.85 超前；负荷 2 是容量为

10kW 的三相负荷，功率因数 0.9 滞后；额定电压均为 110（1±10%）。假设光伏电源直流电压为 120V。计算变压器的额定参数，假设变压器为理想变压器。

如果调制比 M_a 以 0.05 的步长从 0.7 变化到 0.9。计算：

1）变压器低压侧额定值（LV）。

2）变压器高压侧额定值（HV）。

3）以变压器额定值为基值，求出光伏发电系统标幺值模型。

4）该光伏发电系统的标幺值模型。

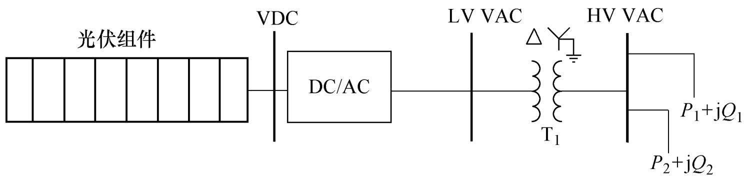


图 3-23　一个离网独立微电网光伏发电系统

解

对于逆变器：

$$V_{\mathrm{L-L,rms}}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot M_a\frac{V_{dc}}{2}$$

将调制比从 0.7 变到 0.9，找到合适电压。

由表 3-3 可知调制比为 0.9 最合适，因此

$$V_{\mathrm{L-L,rms}}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot M_a\frac{V_{dc}}{2}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\times 0.9\times\frac{120}{2}\mathrm{V}=66.13\mathrm{V}$$

$$\text{负荷 1 视在功率}=\frac{kW_1}{pf_1}=\frac{5}{0.85}\mathrm{kVA}=5.88\mathrm{kVA}$$

$$\text{功率因数角}=\arccos 0.85=31.78°\text{，超前}$$

$$\text{负荷 2 视在功率}=\frac{kW_2}{pf_2}=\frac{10}{0.9}\mathrm{kVA}=11.11\mathrm{kVA}$$

$$\text{功率因数角}=\arccos 0.9=25.84°\text{，滞后}$$

表 3-3　不同调制比下的交流母线电压变化

$V_{dc}=120\mathrm{V}$		
调制比 M_a	交流母线电压（低压侧）	交流母线电压（高压侧）
0.70	51.4V	110V
0.75	55.1V	110V
0.80	58.8V	110V
0.85	62.5V	110V
0.90	66.1V	110V

下面选取理想变压器。变压器额定电压为70/110V，其容量应大于或等于其全部负荷，以20kVA为额定容量较合适。

因此，负荷1标幺值 $=S_{\mathrm{pu},1}=\dfrac{kVA_1}{kVA_{\mathrm{base}}}=\dfrac{5.88}{20}=0.29\angle 31.78^\circ$

负荷2标幺值 $=S_{\mathrm{pu},2}=\dfrac{kVA_2}{kVA_{\mathrm{base}}}=\dfrac{11.11}{20}=0.556\angle -25.84^\circ$

对于逆变器：

$$\text{直流侧基值}=\frac{\text{直流侧电压}}{\text{交流侧电压}}\times\text{交流侧电压基值}=\frac{120}{66.13}\times 70\mathrm{V}=127.02\mathrm{V}$$

因此，逆变器直流侧标幺值 $=\dfrac{120}{127.02}=0.94\mathrm{pu}$

$$\text{逆变器交流侧标幺值}=\frac{66.13}{70}=0.94\mathrm{pu}$$

该光伏发电系统的标幺值模型如图3-24所示。

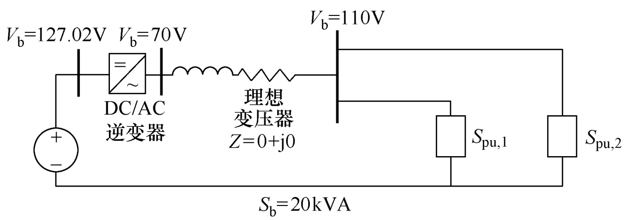


图3-24 图3-23的标幺值模型

例3.7 三相辐射状微电网光伏发电系统如图3-25所示。

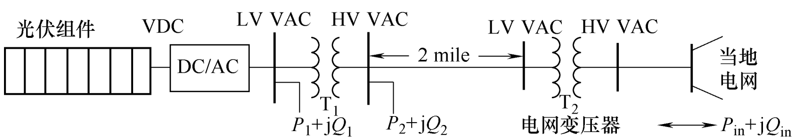


图3-25 辐射状并网型微电网光伏发电系统

假设该光伏发电系统为农场的两个潜水泵供电。负荷1额定视在功率为5kVA，额定交流电压为120V；负荷2额定视在功率为7kVA，额定交流电压为240V。假设负荷电压变化10%，调制比为0.9。配电线路电阻为0.04Ω/mile，电抗为0.8Ω/mile。假设电网电压为460V。计算：

1）变压器 T_1 低压侧（LV）额定值。

2）变压器 T_2 高压侧（HV）额定值。

3）以变压器 T_2 额定值为基值，计算光伏发电系统标幺值模型。假设变压器阻抗为额定值的10%。

解

以变压器 T_2 为基准，其额定电压为240/460V。它要为低压侧负荷供电，且额

定容量要大于负荷容量。选变压器额定容量为 15kVA（>5+7=12），并以此为基值。输电线路的基值为 240V，15kVA。输电线路电抗为其长度乘以单位长度阻抗值。

$$Z_{\text{line}}=2\times(0.04+\text{j}0.8)=0.08+\text{j}1.6\Omega$$

输电线阻抗基值为

$$Z_{\text{b,trans}}=\frac{V_{\text{base}}^2}{VA_{\text{base}}}=\frac{240^2}{15\times10^3}\Omega=3.84\Omega$$

输电线阻抗标幺值为

$$Z_{\text{pu,trans}}=\frac{Z_{\text{trans}}}{Z_{\text{b,trans}}}=\frac{0.08+\text{j}1.6}{3.84}=0.02+\text{j}0.42\text{pu}$$

负荷 2 的标幺值为

$$S_2=\frac{kVA_2}{kVA_{\text{base}}}=\frac{7}{15}=0.467\text{pu}$$

变压器 T_1 电压选择为 120/240V，容量为 15kVA。T_1 低压侧电压基值为 120V。因此，逆变器交流侧电压标幺值 $=\frac{120}{120}=1\text{pu}$，负荷 1 标幺值为

$$S_1=\frac{kVA_1}{kVA_{\text{base}}}=\frac{5}{15}=0.33\text{pu}$$

变压器阻抗为 j0.10pu

对于逆变器：

$$V_{\text{L,rms}}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot M_{\text{a}}\frac{V_{\text{dc}}}{2}$$

选择调制比为 0.9。

$$V_{\text{dc}}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{2\cdot V_{\text{L,rms}}}{M_{\text{a}}}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}=\frac{2\times120}{0.9}\text{V}=217.7\text{V}$$

直流侧电压基值 $=\frac{\text{直流侧电压}}{\text{交流侧电压}}\times$ 交流侧电压基值 $=\frac{217.7}{120}\times120\text{V}=217.7\text{V}$

因此逆变器直流侧电压标幺值 $=\frac{217.7}{217.7}=1\text{pu}$

图 3-25 的标幺值模型如图 3-26 所示。

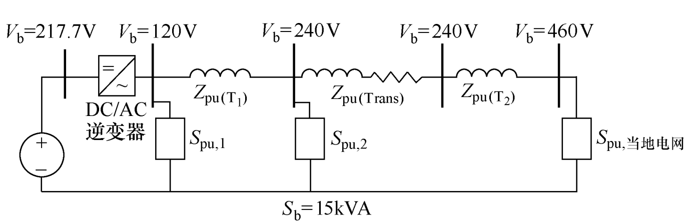


图 3-26　图 3-25 的标幺值模型

3.7 可再生能源微电网

图3-27所示为接入当地电网的区域微电网系统，变压器 T_1 电压为240V/600V，变压器 T_2 将光伏发电系统电压升高后接入当地电网变电站。

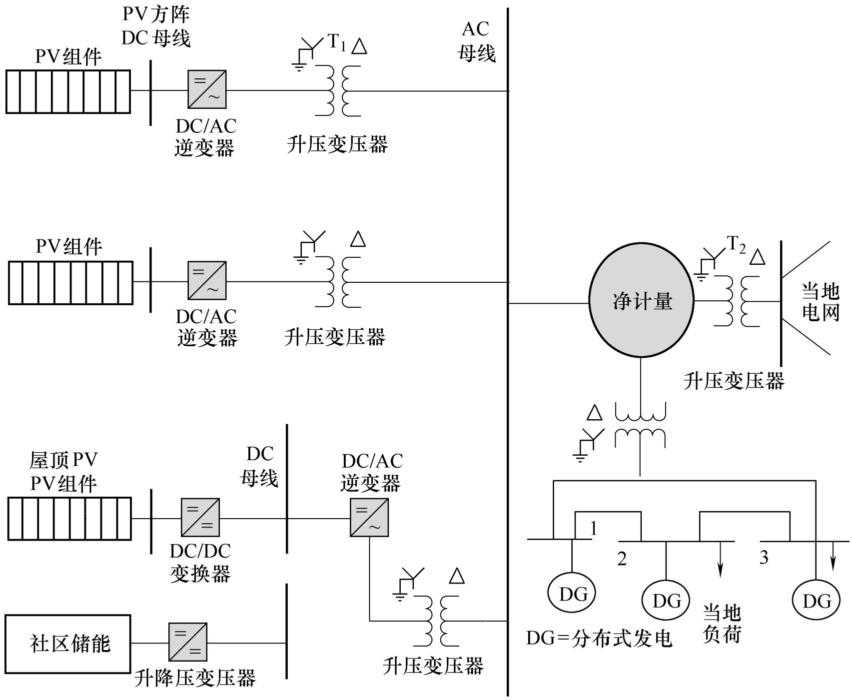


图3-27 接入当地电网的区域分布式微电网系统单线图

例3.8 考虑图3-28所示的由光伏电站供电的微电网，交流母线电压为120V。逆变器调制比为0.9，计算：

1）线路阻抗标幺值。

2）变压器 T_1 和 T_2 的阻抗标幺值。

3）负荷的标幺值模型。

4）等效阻抗标幺值，并画出等效阻抗电路图。假设负荷电路电压基值 V_b 为240V，容量基值 S_b 为500kVA。

解

选择电压基值和功率基值，对于电网侧有：

$$V_b = 240\text{V} \quad S_b = 500\text{kVA}$$

负荷标幺值为 $S_{pu(Load)} = \dfrac{400}{500}\angle -\arccos 0.8 = 0.8\angle -36.87°\text{pu}$

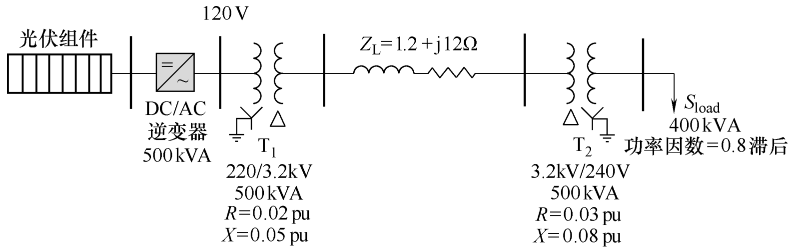


图 3-28　例 3.8 的微电网系统

变压器 T_2 阻抗标幺值为额定值不变，为 0.03 + j0.08。

输电线路阻抗基值计算如下：

$$Z_{b_3200V}=\frac{V_b^2}{S_b}=\frac{(3200)^2}{500\times10^3}\Omega=20.48\Omega$$

输电线阻抗标幺值计算如下：

$$Z_{trans,line,pu}=\frac{Z_{tran,actual}}{Z_{b_3200V}}=\frac{1.2+j12}{20.48}=0.058+j0.586\text{pu}$$

变压器 T_1 相对于其额定值的阻抗标幺值保持不变，为 0.02 + j0.05。

对于逆变器：

$$V_{L,rms}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot M_a\frac{V_{dc}}{2}$$

$$V_{dc}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{2\cdot V_{L,rms}}{M_a}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{2\times120}{0.9}\text{V}=217.7\text{V}$$

$$\text{直流电压基值}=\frac{\text{直流侧电压}}{\text{交流侧电压}}\times\text{交流侧电压基值}=\frac{217.17}{120}\times120\text{V}=217.17\text{V}$$

因此，逆变器直流电压标幺值 $=\frac{217.17}{217.17}=1\text{pu}$

系统的标幺值电路如图 3-29 所示。

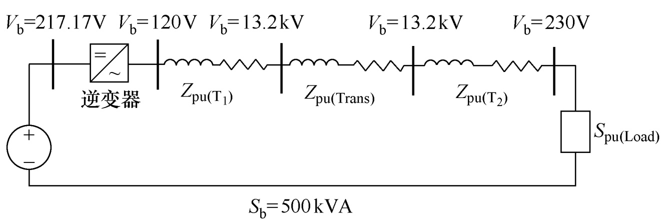


图 3-29　图 3-28 系统的标幺值模型

3.8　绿色能源系统中的直流变换器

直流变换器结构框图如图 3-30 所示。DC/DC 直流变换器是一个三端口元件，通过控制开关频率，使输入电压转换为较高或较低的输出电压。因此，直流变换器是一个电子变压器，类似带抽头的变压器。占空比 D 决定了输入和输出电压的关系。触发信号（见图 3-30）提供变换器开关指令，可以改变占空比 D。根据输出电压比输入电压高或低，变换器称为降压（buck）或升压（boost）变换器或者升降压（buck-boost）变换器。

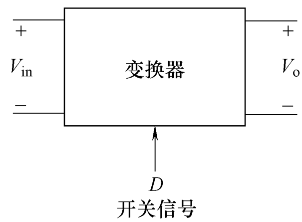


图 3-30　直流变换器结构框图

直流变换器元件包括电感 L、电容 C、可控半导体开关 S、二极管 D 和电阻 R。电力开关是升高直流输入电压的升压变换器和降低输入电压的降压变换器中的关键器件。采用电感和电容间进行能量交换设计直流变换器[4]。流过开关的电流变化速率用电感限制。电感存储磁能，并在下一阶段将能量传递给电容。转换速率用来描述电路中变量相对于时间的变化快慢。暂态操作的大电流受到开关管上的电阻损耗的阻尼。存储的电能单位为焦耳（J），与电流有关，见式（3-44）。

$$\begin{aligned}\text{电感中存储的能量} &= \frac{1}{2}L \cdot i_L^2 \\ \text{电容中存储的能量} &= \frac{1}{2}C \cdot v_C^2\end{aligned} \tag{3-44}$$

式中，i_L 是通过电感的电流，v_C 是电容两端的电压。

电感中存储的能量由电容器回收。电容器为电路提供一个新的可控直流输出电压。

基波电压和电流方程为

$$v_L = L\frac{di_L}{dt} \tag{3-45}$$

$$i_C = C\frac{dv_C}{dt} \tag{3-46}$$

在开关闭合时，它用来使电感充电。但由于电流和电压以式（3-45）和式（3-46）相关联，所以在开关周期中的放电阶段，电感中存储的能量被转移到电容中。电路拓扑中的基本元件可重新配置以降低或者提高输出电压。

3.8.1　升压变换器

光伏组件是变化的直流电源。它的输出功率随太阳的升起而增大，中午时组件捕捉的太阳能达到最大值，此时光伏组件的输出功率也达到最大。随风速变化的风

能电源也是如此。风速小时，一定限度的机械能转变为频率变化的电能；随后，交流电被整流，变成低压直流电源。直流升压变换器把直流电压提高，从而适应电压范围较宽的直流电源。一定范围的较高直流电压可以通过 DC/AC 逆变器转换成与系统频率相同的交流电。

升压变换器也叫 boost 变换器，由电感 L、电容 C、可控半导体开关 S、二极管 D、电阻 R 组成，如图 3-31 所示。

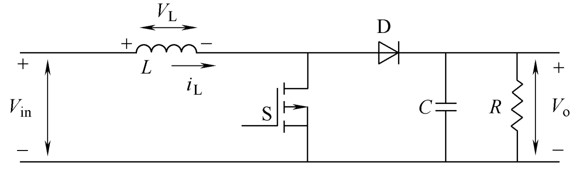


图 3-31　升压变换电路

开关 S 闭合时，电感从电源中吸取能量并将其转换为磁能存储起来。开关断开时，能量转移到电容中。达到稳态时，输出电压将会高于输入电压，同时幅值由开关占空比决定。

为说明升压电路工作原理。假设电感在上一运行周期充电，且变换器稳定运行。设开关 S 断开时为该周期的开始时刻。这种工况如图 3-32a 所示。由于电感在上一周期充满电，它会继续迫使电流通过二极管 D 流到输出电路，向电容充电。假设在下一周期开关 S 导通。二极管被电容电压反向偏置，形成断开状态。等效电路如图 3-32b 所示。此时，电感两端的电压等于输入电压 $+V_{in}$。根据式（3-45），电感电流从初始值开始，以 V_{in}/L 的斜率上升。这时的输出电压仅由已充电的电容提供。图 3-33 给出了电感电流 i_L 的波形。

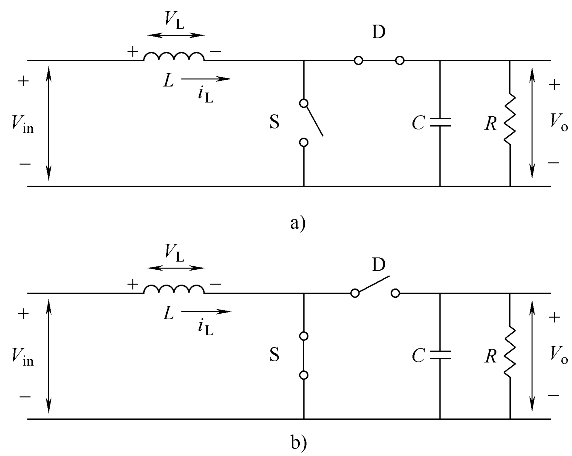


图 3-32　在开关 S 断开、导通时的升压变换器等效电路

a）断开　b）导通

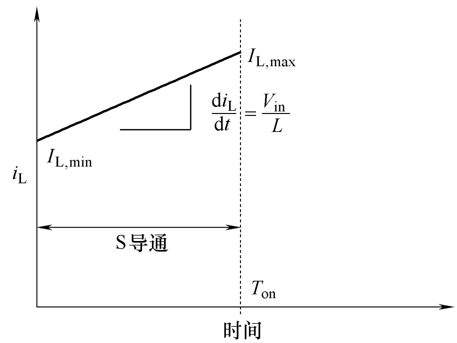


图 3-33　充电阶段：开关导通电感电流上升

来看下一周期，当电力开关 S 再次断开时。存储在电感中的能量转移到电容中。它的等效电路如图 3-32a 所示。在开关开始断开时刻，电感电流为 $I_{L,max}$，如图 3-33 所示。在开关断开前，电流流过开关 S。当开关断开，电感如同电流源，试图保持电流恒定，但此时开关支路不导通。因此，电感迫使电流流过二极管 D，二极管开始导通，使电容充电，电压升高。图 3-32a 所示的等效电路中，电感两端电压为输入和输出电压差。因为输出电压高于输入电压，故电感电压为负值。由式（3-45），电感电流以（$V_{in}-V_o$）/L 的斜率，自 $I_{L,max}$开始下降。当电路工作于稳态时，电感电流在该周期结束时将回到此周期开始时刻的电流值（$I_{L,min}$）。开关断开时的电流波形如图 3-34 所示。

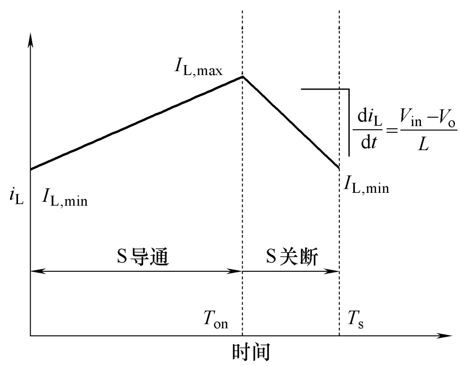


图 3-34　放电阶段：开关断开，电感电流下降

图 3-35 显示了电路稳定运行的几个周期的电感电压和电流波形。在稳态时，电感平均电压为 0，故在稳态运行时，电感电流如预期的那样，是恒定的。若电感平均电压不为 0，则电感平均电流将持续上升或下降，取决于电压的极性。在这种情况下，根据式（3-45），电感电流在一个周期结束时不能回到周期开始时的初始值。

升压变换器处于稳态时的波形如图 3-35 所示。

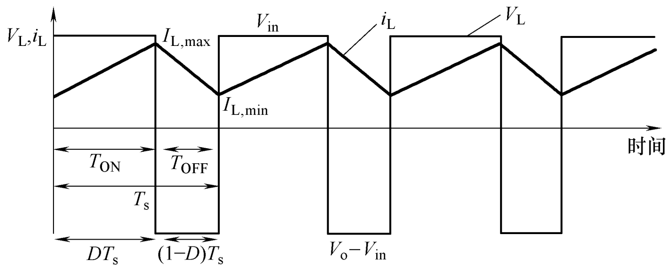


图 3-35　升压变换器的稳态电感电压和电流波形

如果电容电压初始值为 0，电感电流将在若干周期内缓慢给电容充电。电容电压每个周期上升直至达到稳态。

下面分析图 3-31 给出的升压变换器的运行情况。图 3-35 中的变量 D 为开关管的占空比，i_L 和 v_L 分别为电感电流和电压，它们的方向和极性如图 3-31 和图 3-32 所示。开关导通时，电流从直流电源流过电感 L。随后经开关 S 流回直流电源。在图 3-32b中，二极管被电容输出电压反向偏置。如图 3-35 所示，在 $D \cdot T_s$ 阶段，能量存储在电感中，电感两端电压为 V_{in}。当开关断开时，在（$1-D$）$\cdot T_s$ 时段，电感迫使电流流过二极管给电容充电，通过二极管形成输出电压。电感电压为 $-(V_o - V_{in})$，为负值，因为 $V_o > V_{in}$。在 T_s 结束时刻，电容满充，电感能量转移到了电容中。

在稳态运行阶段，电感平均电压为 0，即 $V_L = 0$，则

$$\frac{1}{T_s} \cdot [V_{in} \cdot DT_s - (V_o - V_{in}) \cdot (1-D) \cdot T_s] = 0$$

或

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \tag{3-47}$$

式中，f_S 为开关频率，开关周期 $T_s = 1/f_S$，且 $T_s = T_{on} + T_{off}$（见图 3-35）定义为开关周期。占空比定义为

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \tag{3-48}$$

则

$$T_{off} = T_s - T_{on} = (1 - T_{on}/T_s)T_s = (1-D)T_s \tag{3-49}$$

我们知道 D 值小于 1。所以输出电压总是高于输入电压。根据功率平衡，可以用输出电压得到输入电流的表达式。因为在无损系统中输入和输出功率必须相等，可以算得输出电流。

$$V_{in} \cdot I_{in} = V_o \cdot I_o \tag{3-50}$$

式中，I_{in} 和 I_o 分别是平均输入和输出电流，可以算得

$$I_{in} = I_L = \frac{V_o}{V_{in}} \cdot I_o \tag{3-51}$$

$$I_{in}=\frac{I_o}{1-D} \tag{3-52}$$

式中，I_L 是电感平均电流。通过图 3-31 可以看出，输入电流就是电感电流。

电感电流的纹波 ΔI_L 是稳态时电感电流最大值和最小值的差。根据式（3-45），可以知道通过多长时间电感电压可以达到什么值。通过图 3-32b，可以看出电感电压在 $D\cdot T_s$ 时间后达到 $+V_{in}$，因此根据式（3-45）和图 3-35 有：

$$\Delta I_L=I_{L,max}-I_{L,min}=\frac{V_{in}}{L}\cdot DT_s \tag{3-53}$$

电感电流的最大最小值可以从由平均值和电流变化值得到，见式（3-54）[㊀]。

$$I_{L,max}=I_L+\frac{\Delta I_L}{2},I_{L,min}=I_L-\frac{\Delta I_L}{2} \tag{3-54}$$

电路经几个周期后达到稳态。开始时，电容电压为零，该零电压一直保持到开关第一次导通。在 T_{on}时段内，电感电流流过开关 S，电容与输入电路不连通（见图 3-32b 的等效电路）。时间 T_{on}后，开关 S 断开，电容开始充电，此时的等效电路如图 3-32a 所示。根据基尔霍夫电压定律，可得

$$V_{in}=L\frac{di_L}{dt}+v_C \tag{3-55}$$

电容电流如式（3-46）所示。图 3-32a 所示电路中，空载时电容电流和电感电流相等。将 $i_C=i_L$ 代入式（3-46），并把它用于式（3-55），可得

$$V_{in}=LC\frac{d^2v_C}{dt^2}+v_C \tag{3-56}$$

将 $1/LC=\omega_0^2$ 代入式（3-56），解带初始状态的微分方程，得

$$v_C(t)=\frac{I_{Ton}}{C\omega_0}\sin\omega_0(t-T_{on})-V_{in}\cos\omega_0(t-T_{on})+V_{in} \tag{3-57}$$

在开关周期 T_s 结束时刻，将 $t=T_s$ 代入式（3-57）可得到电容电压。利用 $T_{off}=T_s-T_{on}$可得

$$v_C(T_s)=\frac{I_{Ton}}{C\omega_0}\sin\omega_0T_{off}-V_{in}\cos\omega_0T_{off}+V_{in} \tag{3-58}$$

同时，在开关周期 T_s 结束时刻，开关 S 与输出侧不连接，而且其电压保持上述值不变。在下一周期，开关 S 再次关断，电容电压再次开始上升。理想状态下，空载时，电容电压会持续上升，不会达到稳定。但是在实际电路中，二极管和开关阻尼电路中的电阻会使电容电压稳定在一定数值上。电容值越大，电容电压达到稳态的时间越长。图 3-36 显示了由 40V 电源供电，电感为 1mH，电容为 100μF，占空比为 50% 的升压变换器中的电容电压升高。

㊀ 译者注：原文误为式（3-67）。

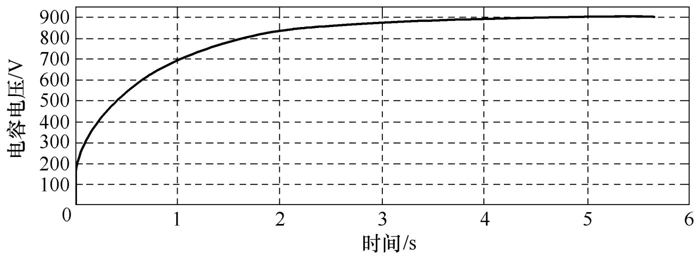


图 3-36　电源电压 40V，占空比为 50% 的升压变换器空载时的输出电压上升

例 3.9　考虑图 3-37 的微电网。假设光伏发电站可输出功率 175kW，变压器 T_1 容量为 75kVA，240V/120V，短路阻抗为 5%；变压器 T_2 容量为 150kVA，240V/460V，短路阻抗为 10%。假设功率基值为 1000kVA，电压基值为 460V。三相逆变器调制比为 0.8，升压变换器占空比为 0.6。计算：

1）变压器 T_1 和变压器 T_2 的标幺值和负荷的标幺值模型。

2）标幺值等效电路图并给出阻抗值电路图。

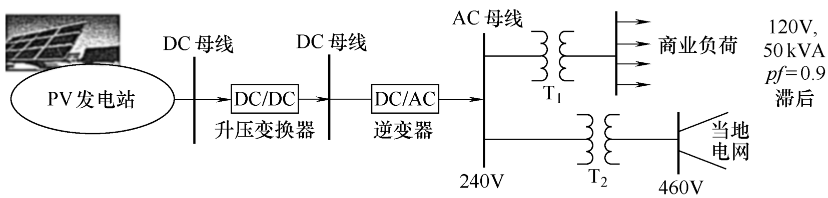


图 3-37　例 3.9 系统单线图

解

电网侧功率基值选为 1000kVA，电压基值选为 460V，于是有

$$V_{\mathrm{bnew}}=460\mathrm{V}\qquad S_{\mathrm{bnew}}=1000\mathrm{kVA}$$

因此，以 460V 为电压基值的阻抗基值为

$$Z_{\mathrm{b460V}}=\frac{V_{\mathrm{b}}^2}{S_{\mathrm{b}}}=\frac{(460)^2}{1000\times10^3}\Omega=0.2116\Omega$$

对于新基值，对变压器 T_2，有：

$$Z_{\mathrm{pu_new}}=Z_{\mathrm{pu_old}}\times\left(\frac{V_{\mathrm{b_old}}}{V_{\mathrm{b_new}}}\right)\frac{S_{\mathrm{b_new}}}{S_{\mathrm{b_old}}}$$

$$Z_{\mathrm{pu_new-T_2}}=0.1\times\left(\frac{460}{460}\right)^2\times\frac{1000}{150}=0.67\mathrm{pu}$$

变压器 T_1 的原参数在额定铭牌上给出，在新选定基值下计算 T_1 的阻抗标幺值有：

$$Z_{\mathrm{pu_new-T_1}}=0.05\times\left(\frac{240}{240}\right)^2\times\frac{1000}{75}=0.67\mathrm{pu}$$

变压器 T_1 低压侧电压基值由原电压值和现电压基值之比计算（低压侧或高压侧）。

$$V_{\mathrm{b_new(LV)}}=\frac{V_{\mathrm{b_new(HV)}}}{V_{\mathrm{b_old(HV)}}}V_{\mathrm{b_old(LV)}}$$

利用变压器 T_1 的铭牌额定值和现电压基值，电压计算如下：

$$V_{\mathrm{b_new(LV)}}=\left(\frac{240}{240}\right)\times 120\mathrm{V}=120\mathrm{V}$$

负荷标幺值计算如下：

$$S_{\mathrm{pu(load)}}=\frac{50}{1000}\angle -\arccos 0.9=0.05\angle -25.84^{\circ}\mathrm{pu}$$

对于逆变器：

$$V_{\mathrm{L,rms}}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot M_{\mathrm{a}}\frac{V_{\mathrm{dc}}}{2}$$

$$V_{\mathrm{dc}}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{2\cdot V_{\mathrm{L,rms}}}{M_{\mathrm{a}}}=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{2\times 240}{0.8}\mathrm{V}=489.9\mathrm{V}$$

$$\text{直流侧电压基值}=\frac{\text{直流侧电压}}{\text{交流侧电压}}\times\text{交流侧电压基值}=\frac{489.9}{240}\times 240\mathrm{V}=489.9\mathrm{V}$$

因此，逆变器直流侧标幺值 $=\frac{489.9}{489.9}=1\mathrm{pu}$

对于直流变换器：

$$V_{\mathrm{o}}=\frac{V_{\mathrm{in}}}{1-\text{占空比}}$$

$$V_{\mathrm{in}}=(1-\text{占空比})\times V_{\mathrm{o}}=(1-0.6)\times 489.9\mathrm{V}=195.96\mathrm{V}$$

低压侧基值为

$$\text{直流侧电压基值}=\frac{\text{低压侧电压}}{\text{高压侧电压}}\times\text{高压侧电压基值}$$

$$\text{直流侧电压基值}=\frac{195.96}{489.9}\times 489.9\mathrm{V}=195.96\mathrm{V}$$

因此，逆变器直流侧标幺值 $=\frac{195.96}{195.96}=1\mathrm{pu}$

图 3-37 系统的标幺值模型如图 3-38 所示。

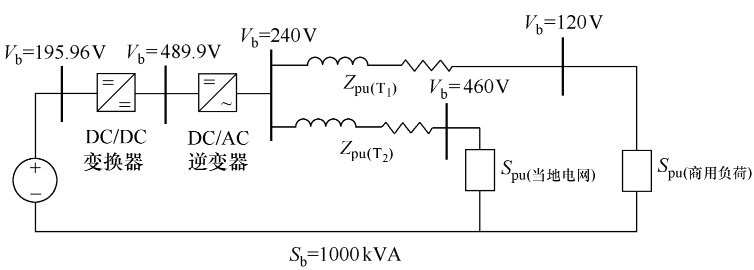


图 3-38 图 3-37 系统的标幺值模型

例 3.10　编写 MATLAB 程序，生成输入电压为 120V，占空比为 0.75 的升压变换器电压和电流波形。电容值为 100μF。画出稳态时电感电压和电流波形。

解

```
% Boost Converter
clc; clear all;
Vin=120;                %input dc value
D=0.75;                 %duty ratio
L=1e-3;                 %inductor value
R=20;                   %load resistance
f=5e3;                  %switching frequency

T=1/f;                  %switching time period
Vo=Vin/(1-D);           %output voltage is defined
Io=Vo/R;
Iin=Io/(1-D);
I_Lavg=Iin;
dI_L=Vin/L*D*T;         %inductor ripple current
I_Lmin=I_Lavg-dI_L/2;   %minimum inductor current
I_Lmax=I_Lavg+dI_L/2;   %maximum inductor current
V_L=0;
V_Lp=Vin;               %positive voltage of inductor
V_Ln=Vin-Vo;            %negative voltage of inductor

for k=0:T/500:5*T       % to plot from 0 to 0.04 sec in
                        steps of Ts/500
  plot (k,0,'k');
  V_L_old=V_L;
  if(rem(k,T)<D*T)      % V_L is defined using equations
                        of line
    V_L=V_Lp;
  else
   V_L=V_Ln;
 end
 if(rem(k,T)<D*T)      % I_L is defined using equations
                       of line
   I_L=I_Lmin+(I_Lmax-I_Lmin)/D/T*rem(k,T);
 else
   I_L=I_Lmax-(I_Lmax-I_Lmin)/(1-D)/T*(rem(k,T)-D*T);
 end

 plot (k,V_L,'k');     %V_L is plotted in black ('k')
 hold on;
 %the points of discontinuities are joined by a
vertical line
 if V_L_old~= V_L
   for j= V_Ln :.1:V_Lp
```

```
        plot(k,j,'k')
      end
    end
    plot(k,I_L,'r');      %I_L is plotted in black 'r'
    hold on;
  end
  grid on;
  xlabel('time (sec)');
  ylabel('Inductor voltage (V) and current (Amp)');
  title('Steady state voltage and current plot');
```

结果如图 3-39 所示。

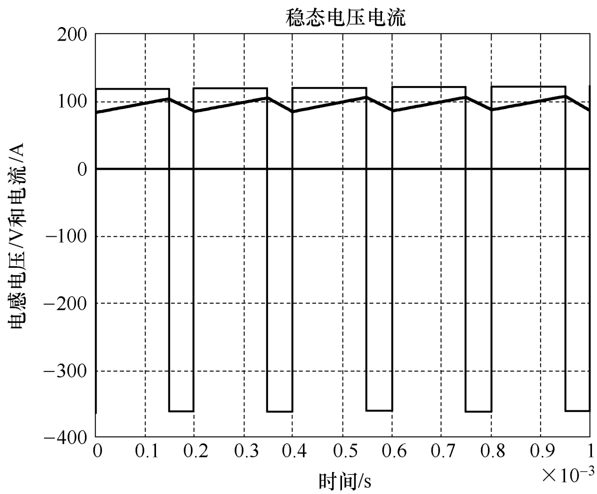


图 3-39 例 3.10 中的电感电压和电流波形

3.8.2 降压变换器

作为绿色能源微电网的变换器，降压和升压变换器用于降低或升高直流母线电压。给蓄电池充电时，直流母线电压降低到蓄电池母线的电压。要使用储能系统中存储的电能，需要用直流变换器来升高储能系统直流母线电压。

目前，住宅和商用蓄电池的额定电压一般是 DC 6V 和 12V。3 个 DC 12V 电池可以串接在一起成为一个直流母线电压为 36V 的社区储能系统。为得到容量较大的储能系统，可将多个 36V 的直流系统并联起来。大容量直流储能系统常作为社区储能装置放在变电站内。

降压变换器是变换器的基本类型，也被称为 buck 变换器。从变换器的名字可知，这种变换器的主要功能是将输入直流电压降为较低的直流电压。降压变换器的主要元件有半导体开关 S、二极管 D、电感滤波器 L 和电容滤波器 C，如图 3-40 所示。

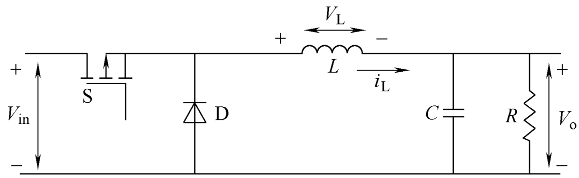


图 3-40　降压变换器电路图

变换器运行周期从开关 S 导通开始。此时二极管 D 被输入电压反向偏置并断开。等效电路如图 3-41 所示。

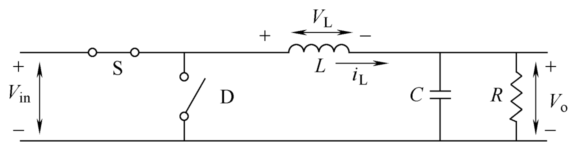


图 3-41　降压变换器开关 S 导通时的等效电路

从图 3-41 可以看出，电感两端的电压为 $V_{in}-V_o$。因为输入电压高于输出电压，电感电压为正，电感充电。电感电流可由式（3-45）得出。v_L 为正，则 di_L/dt 为正，电流从初始值上升。只要开关 S 导通，这个过程就会持续，这就是图 3-42 的 T_{on}时段。此时，电感持续充电，能量以磁能形式存储其中，并在下一运行阶段释放给电容。

在 T_{on}结束时刻，开关 S 关断，下一运行阶段开始。电感电流需持续。开关断开时，电感迫使二极管导通。在这一运行阶段，开关 S 关断，二极管 D 导通续流。等效电路如图 3-43 所示。

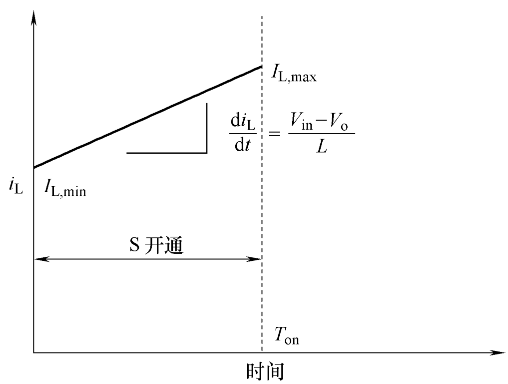


图 3-42　降压电路电感充电阶段

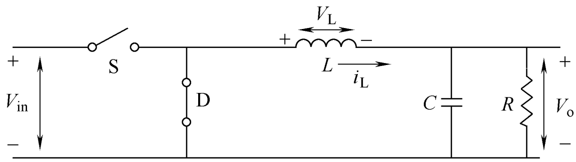


图 3-43 S 断开、D 导通时的等效电路

如图 3-43 所示，电感两端的电压为 $-V_o$。在此阶段，电感电流按式（3-58）下降。因为电压为负，di_L/dt 为负值，电流从初始值下降。此时电感与电源断开，能量从电感流向电容 C 和负荷。此阶段一直持续到开关 S 在开关周期结束时关断为止。该阶段电流波形如图3-44所示。

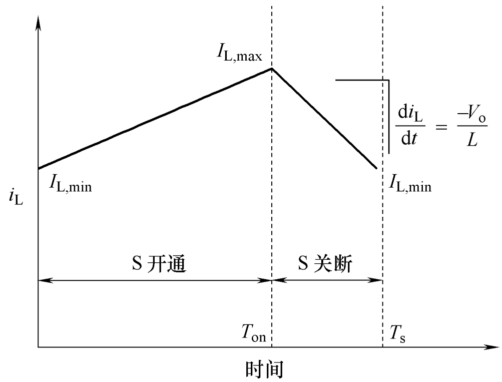


图 3-44 降压电路的电感放电阶段

可见，电感起着把能量从输入电路转移到输出电路的作用。当开关导通时（见图 3-41），电感从电源充电。随后，当开关断开时（见图 3-43），它把能量输送到电容和负荷。当变换器在该周期结束后达到稳态时，电感电流会回到该周期开始时刻的电流值。降压变换器的稳态运行如图 3-45 所示。

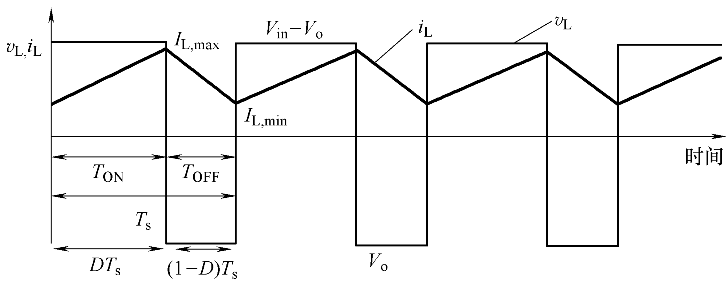


图 3-45 降压变换器的电压和电流波形

为推导输入-输出电压的关系，假设传导模式为连续。稳态运行时，电感两端

平均电压在一个开关周期内为 0。因此有

$$\frac{(V_{in}-V_o)\times D\times T_s - V_o\times(1-\mathrm{D})\times T_s}{T_s}=0 \tag{3-59}$$

即

$$V_o = D\cdot V_{in} \tag{3-60}$$

式中，D 为占空比，f_s为开关频率，$T_s=1/f_S$为开断周期，占空比定义为

$$D=\frac{T_{on}}{T_s}, 1-D=\frac{T_{off}}{T_s} \tag{3-61}$$

因为无损系统中输入和输出功率必须平衡，所以可以计算输入电流为

$$V_{in}\cdot I_{in}=V_o\cdot I_o$$

式中，I_{in}和 I_o分别为平均输入和输出电流。可得

$$I_{in}=\frac{V_o}{V_{in}}\cdot I_o = DI_o \tag{3-62}$$

与升压变换器类似，电感电流中的纹波 ΔI_L是稳态时最大值和最小值的差。由式（3-45）可得：

$$\Delta I_L = I_{L,max}-I_{L,min}=\frac{V_o}{L}\cdot(1-D)T_s \tag{3-63}$$

$$I_{L,max}=I_L+\frac{\Delta I_L}{2}, I_{L,min}=I_L-\frac{\Delta I_L}{2} \tag{3-64}$$

式中，I_L是电感电流平均值，稳态时电容电流为零；因此电感电流等于输出电流。

$$I_L = I_o \tag{3-65}$$

例 3.11　假设一光伏发电系统的直流母线电压为 DC 120V，它的降压变换器占空比为 0.75，开关频率为 5kHz，通过光伏系统母线供电。电感 L 为 1mH，电容 C 为 100μF，将蓄电池视为阻值为 4Ω 的负载。

计算：

1）输出电压。

2）电感电流最大值和最小值。

3）开关 S 和二极管 D 的额定参数。

解

1）输出电压

$$V_o = D\cdot V_{in}$$

$$V_o = 0.75\times 120\text{V} = 90\text{V}$$

2）输出电流

$$I_o=\frac{V_o}{R}=\frac{90}{4}\text{A}=22.5\text{A}$$

电感电流平均值可以计算如下：

$$I_L = I_o = 22.5\text{A}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} \cdot (1-D) T_s = \frac{V_o}{L} \cdot (1-D)\frac{1}{f} = \frac{90}{0.001} \times (1-0.75) \times \frac{1}{5000}\text{A} = 4.5\text{A}$$

电感电流最大值为

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = 22.5\text{A} + \frac{4.5}{2}\text{A} = 24.75\text{A}$$

电感电流最小值为

$$I_{L,min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = 22.5\text{A} - \frac{4.5}{2}\text{A} = 20.25\text{A}$$

3）开关 S 关断时，开关两端电压为输入电压。因此，开关额定电压应高于 120V。通过开关的最大电流为 $I_{L,max} = 24.75\text{A}$。因此，额定电流为 25A。

类似地，二极管两端的最大电压为输入电压，流过的最大电流为电感电流最大值。因此，选择二极管额定参数为 120V，25A。

例 3.12 编写 MATLAB 程序，生成例 3.11 中降压变换器的电压和电流波形。

MATLAB 程序：

```
% Buck Converter
clc; clear all;
Vin=120;                %input dc value
D=0.75;                 %duty ratio
L=1e-3;                 %inductor value
R=4;                    %load resistance
f=5e3;                  %switching frequency

T=1/f;                  %switching time period
Vo=D*Vin;               %out put voltage is defined
Io=Vo/R;
I_Lavg=Io;
dI_L=Vo/L*(1-D)*T;      %inductor ripple current
I_Lmin=I_Lavg-dI_L/2;   %minimum inductor current
I_Lmax=I_Lavg+dI_L/2;   %maximum inductor current
V_L=0;
V_Lp=Vin-Vo;            %positive voltage of inductor
V_Ln=-Vo;               %negative voltage of inductor
for k= 0:T/500:5*T      % to plot from 0 to 0.04 sec in
                        steps of Ts/500
  plot (k,0,'k');
  V_L_old=V_L;
  if(rem(k,T)<D*T)      % V_L is defined using equations
                        of line
    V_L=V_Lp;
  else
    V_L=V_Ln;
  end
```

```
  if(rem(k,T)<D*T)      % I_L is defined using equations
                        of line
    I_L=I_Lmin+(I_Lmax-I_Lmin)/D/T*rem(k,T);
  else
    I_L=I_Lmax-(I_Lmax-I_Lmin)/(1-D)/T*(rem(k,T)-D*T);
  end

  plot (k,V_L,'k');     %V_L is plotted in black ('k')
  hold on;

  %the points of discontinuities are joined by a vertical
line
  if V_L_old~= V_L
    for j= V_Ln :.1 :V_Lp
      plot(k,j,'k')
    end
  end

  plot(k,I_L,'r');      %I_L is plotted in black 'r'
  hold on;
end
grid on;
xlabel('time (sec)');
ylabel('Inductor voltage (V) and current (Amp)');
title('Steady state voltage and current plot');
```

结果如图 3-46 所示。

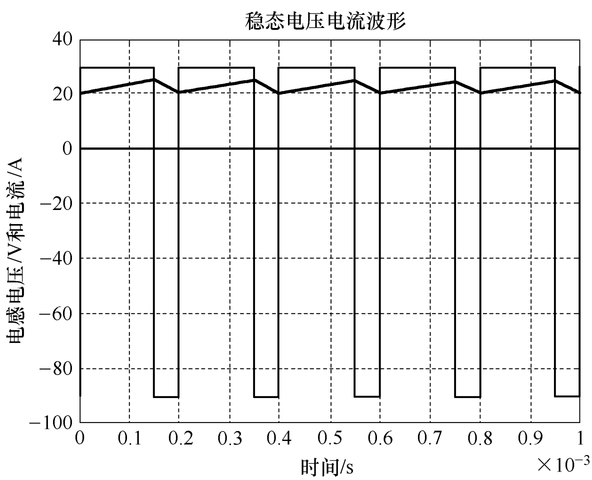


图 3-46 例 3.12 中的电感电压和电流

与升压变换器类似，降压变换器也需要经过几个周期运行才能达到稳态。电容

电压最初为零，电感经过若干周期将能量传递给电容，电容电压升高并达到稳态，稳态值由占空比 D 决定。如果变换器空载，也就是说输出端开路而不连接电阻，则电容电压将保持稳态值不变，稳态值由占空比 D 决定。

3.8.3 升降压变换器

升降压变换器包括输入电压 V_{in}、电感 L、电容 C、电阻 R 和可控开关 S，如图 3-47 所示。

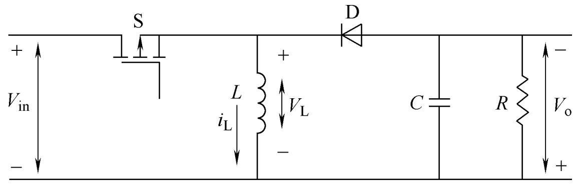


图 3-47 升降压变换器电路图

下面从开关 S 导通开始来分析升降压变换器的运行。开关 S 导通时，二极管 D 被输入和输出电压反向偏置（输出直流母线电压上端为负），输入电压为电感两端的电压。等效电路如图 3-48 所示。电感电压为正，电感电流从初始值按式（3-45）开始上升。在此阶段，电感存储的能量开始增加。

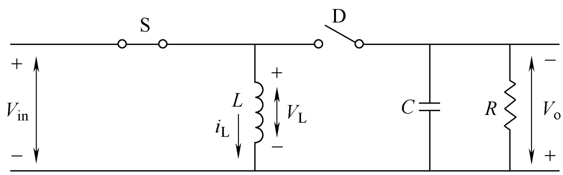


图 3-48 开关 S 导通时升降压变换器的等效电路

电感电流波形如图 3-49 所示。电感电流在开关导通期间以 V_{in}/L 的斜率上升。

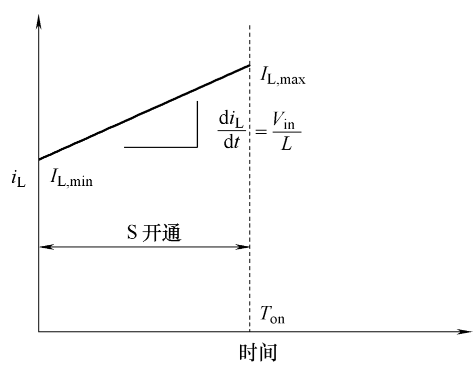


图 3-49 开关导通时电感电流

在导通阶段结束后，开关关断；二极管因电感电流续流而导通。等效电路如图 3-50 所示。

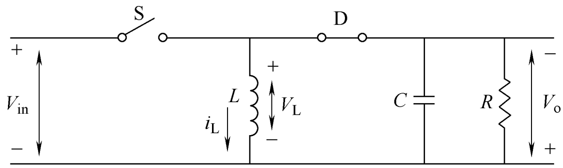


图 3-50　开关 S 关断时升降压变换器的等效电路

此时，存储在电感中的能量转移到电容 C 中。电感电流波形如图 3-51 所示。

在稳态运行中，电感电流须在此开关周期结束时回到周期初始时刻值。稳态波形如图 3-52 所示。

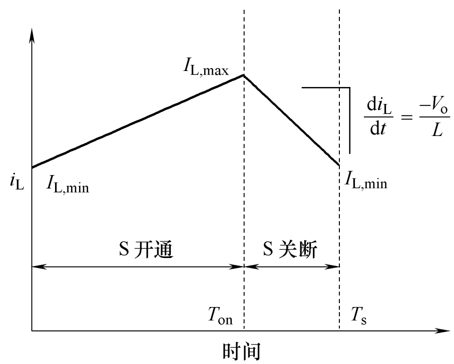


图 3-51　开关关断时电感电流

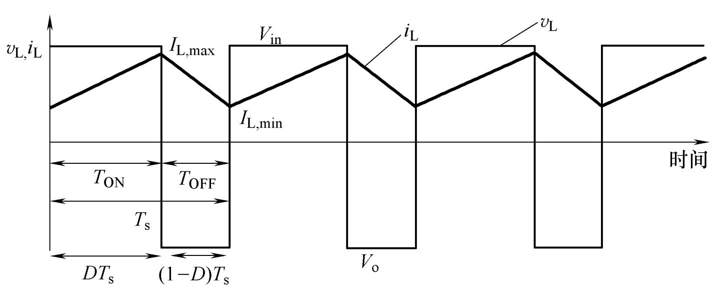


图 3-52　升降压变换器的电压和电流波形

与其他变换器类似，电感电压平均值为 0：

$$\frac{V_{in} \cdot DT_s - V_o \cdot (1-D) \cdot T_s}{T_s} = 0 \tag{3-66}$$

从上式可计算输入-输出电压间的比例关系为

$$V_o = \frac{D \cdot V_{in}}{1 - D} \tag{3-67}$$

式中，f_s为开关频率，$T_s = 1/f_S$定义为开关周期。

占空比定义为

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \tag{3-68}$$

输出电压值由占空比决定。如果 D 小于 0.5，变换器使电压降低，如果 D 大于 0.5，则电压升高。

由于输入输出能量平衡，所以

$$V_{in} \cdot I_{in} = V_o \cdot I_o \tag{3-69}$$

式中，I_{in}和 I_o 分别为输入和输出平均电流。可算得

$$I_{in} = \frac{V_o}{V_{in}} \cdot I_o = \frac{D \cdot I_o}{1 - D} \tag{3-70}$$

由图 3-53 所示，假定平均输入电流为（图中的梯形面积除以时间）：

$$I_{in} = \frac{1}{T_s} \cdot \left(\frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2}\right) \cdot D \cdot T_s = D \cdot \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} \tag{3-71}$$

由图 3-53，电感电流平均值为

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{1}{T_s} \cdot \left[\left(\frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2}\right) \cdot DT_s + \left(\frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2}\right) \cdot (1 - D) T_s\right] \\ &= \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} \end{aligned} \tag{3-72}$$

由式（3-71）和式（3-72），

$$I_{in} = D \cdot I_L \tag{3-73}$$

电感电流纹波 ΔI_L 为稳态时电流的最大值与最小值的差值。

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_{in}}{L} DT \tag{3-74}$$

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2}, I_{L,min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \tag{3-75}$$

对全部 3 种变换电路，我们假定其输出电压恒定且坚挺。然而，实际上，电容电压会在平均值上叠加小脉动。输出电压质量由其包含的脉动量决定。脉动越小输出电压质量越好。输出电压脉动可通过增大电容值 C 或提高开关频率 f_s 来减小。但是增大电容值会提高成本，增大体积。而提高开关频率会增大开关损耗，降低变换器效率。因此，需在输出电压质量、电容器体积和开关频率之间加以权衡。电感电流应保持为小的正值，为此需要使电感值尽可能小。此外，若电感电流波动较大，则流过开关的最大电流增大，因而会加大开关额定值和损耗。然而为减小电感电流脉动，电感值应越高越好；但增大电感会使变换器体积增大，成本提高。因此，需在电感、电容、开关频率和变换器成本、体积与效率间折中

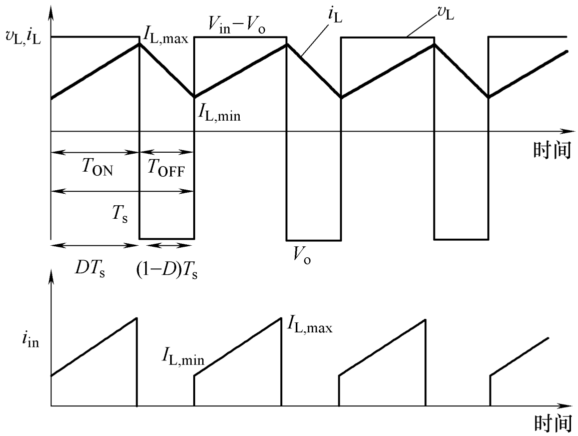


图 3-53　升降压变换器的输入电流波形

选择。

例 3.13　设计一个升降压变换器，输入电源为电压在 80～140V 变化的光伏电源，取决于可用的阳光辐照量。变换器为固定直流电压为 120V、功率为 10kW 的负荷供电。求出为保证向负荷在额定电压下可靠供电所需的变换器占空比。

解

电路输出电压为

$$V_o = 120\text{V}$$

额定功率设为

$$P = 10\text{kW}$$

故额定输出电流为

$$I_o = \frac{10\times10^3}{120}\text{A} = 83.33\text{A}$$

最大平均输入电流额定值为

$$I_{ave} = I_{in} = \frac{10\times10^3}{80}\text{A} = 125\text{A}$$

输入电压为 80V 时的占空比为

$$D = \frac{V_o}{V_{in}+V_o} = \frac{120}{80+120} = 0.6$$

输入电压为 140V 时的占空比为

$$D = \frac{V_o}{V_{in}+V_o} = \frac{120}{140+120} = 0.46$$

因此，占空比范围是 $0.46 \leqslant D \leqslant 0.6$。

3.9　整流器

整流器是将交流电变换成直流电的电力变换器[2,3]。三相二极管桥式整流电路包括 3 个支路以及其上的 6 个二极管，如图 3-54 所示。整流电路的输入为三相交流电压，输出为直流电压。输出电压的瞬时值与输入线电压相同。当交流电压为正时，每个支路上正向偏置的二极管自行导通，输入的交流电压整流为直流电压。这个换相过程称为电网换相。当交流输入电压为负时，二极管反向偏置，起电路开断作用。

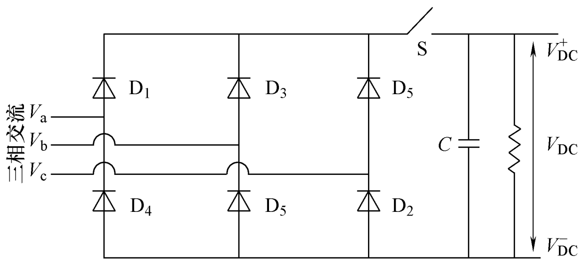


图 3-54　三相整流器

假设以下电压施加于图 3-54 中的三相整流器：

$$
\begin{aligned}
V_a &= \sqrt{2}V \cdot \sin\ (2\pi f \cdot t) \\
V_b &= \sqrt{2}V \cdot \sin\left(2\pi f \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
V_c &= \sqrt{2}V \cdot \sin\left(2\pi f \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)
\end{aligned}
\tag{3-76}
$$

式中，V 是每相电压方均根值（V）；f 是电压频率（Hz）；t 为时间（s）。

图 3-55 所示线电压可表示为

$$
\begin{aligned}
V_{ab} &= V_a - V_b \\
V_{bc} &= V_b - V_c \\
V_{ca} &= V_c - V_a \\
V_{ba} &= -V_{ab} \\
V_{cb} &= -V_{bc} \\
V_{ac} &= -V_{ca}
\end{aligned}
$$

整流器的输入线电压和输出电压如图 3-55 所示。输入电压包括 3 个频率为 60Hz 的交流电压，通过整流电路，在输出端整流为单极性电压。各时刻输入电压和二极管的导通情况在图中给出。在任意时刻，均会有两个二极管导通：一个位于某一支路的上端，另一个位于另一支路的下端。具体哪两个二极管导通由该时刻最大的正向线电压决定。

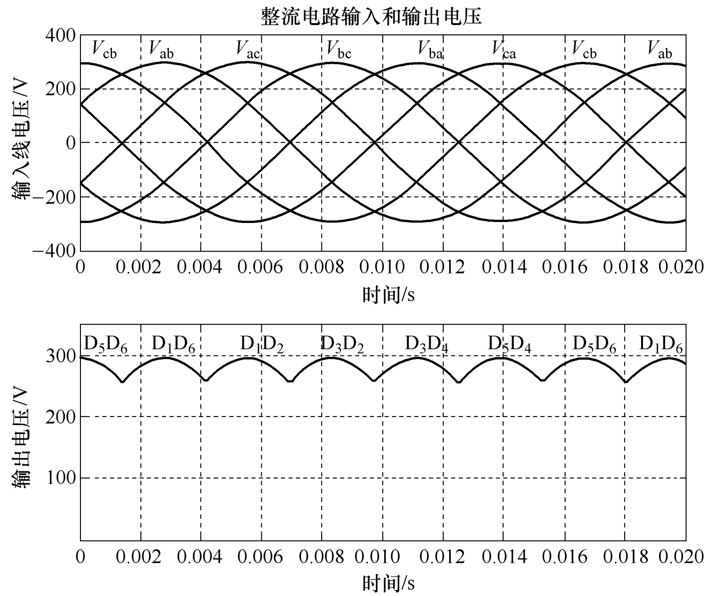


图 3-55　三相整流器输入线电压和输出电压以及开关导通情况

为说明整流电路的运行原理，从时间 $t=0$ 开始。此时，如图 3-55 所示，V_{cb}为最大正向电压。因此，二极管 D_5 和 D_6 导通（见图 3-55）。因为输入电压的频率为 60Hz，输入电压的周期为 16.667ms（$T=1/f$）。因此，1.38ms 后，电压 V_{ab}达到最大正向电压。二极管 D_1 在电压 V_{ac}下正向偏置导通（V_{ac}为正，在 D_1 和 D_5 之间）。此时，D_5 反向偏置而关断。D_1 和 D_6 在 V_{ab}为最大正向电压时导通。经过 1/6 周期，在 4.16ms 时，电压 V_{ac}正向值大于 V_{ab}。D_2 在电压 V_{bc}变为正值时，正向偏置。同时，D_6 反向偏置关断（见图 3-55）。输出电压为 V_{ac}（D_1 和 D_2 导通）。类似地，在下一 1/6 周期 D_1 关断 D_3 导通，输出电压为 V_{bc}。接下来，输出电压依次为 V_{bc}、V_{ba}、V_{ca}、V_{cb}和 V_{ab}，相应各阶段导通二极管分别为 D_3D_2、D_3D_4、D_5D_4、D_5D_6 和 D_1D_6（见图 3-55）。

当各二极管正向偏置时，整流电路的输出电压如图 3-55 所示。整流电路仿真时，可记录这些期间的输出电压。

从图 3-55 可以看出，输出电压是含脉动纹波的直流电压。可计算输出直流电压平均值如下：

$$V_{idc}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_{ab,rms} \tag{3-77}$$

这是在图 3-54 开关 S 断开（空载）时整流电路输出端的输出电压。电压由直流分量和叠加其上的脉动纹波组成。为平滑负荷端的纹波，可将电容 C 接在负荷端，以滤除纹波，使输出电压恒定。如果开关 S 闭合，输出点不接负荷，则端子间

电压为线电压峰值（$V_{idc}=\sqrt{2}\cdot V_{ab,rms}$）。电压平均值会因连接负荷而降低，降低程度与负荷电流特性和幅值有关。

例 3.14 编写 MATLAB 程序，模拟二极管桥式三相整流器。在 MATLAB 仿真模拟中，假设输入交流电压为 120V（RMS），进行如下操作：

1）画出输入线电压。

2）画出输出直流电压。

3）证明输出电压瞬时值与输入最大电压相等。

解

编写程序的步骤为

1）定义输入相电压。

2）通过输入相电压来定义线电压。

3）画出 3 个线电压及其负向的电压曲线。

4）输出电压瞬时值是该时刻输入线电压中的最大正值。

5）画出输出电压曲线。

编写 MATLAB 程序如下：

```
% Rectification
clc;
f=60;
V=120;              % rms value of input line-
                    to-neutral voltage
t=0:0.0001:40e-3;
Va=V*sqrt(2)*
sin(2*pi*f*t);      % instantaneous input voltages defined
Vb=V*sqrt(2)*sin(2*pi*f*(t-1/f*2/3));
Vc=V*sqrt(2)*sin(2*pi*f*(t-1/f*4/3));
Vab=Va-Vb;          % the line-to-line voltages found out
Vbc=Vb-Vc;
Vca=Vc-Va;
Vba=-Vab;
Vcb=-Vbc;
Vac=-Vca;
subplot(2,1,1)      % input voltages are plotted
plot(t,Vab,t,Vbc,t,Vca,t,Vba,t,Vcb,t,Vac);
grid on;
xlabel('time (in sec)');
ylabel('input line voltages (V)');
title('Input and Output Voltages of a Rectifier')
Vx1=max(Vab,Vbc); % the maximum instantaneous voltage
                    is found out
Vx2=max(Vx1,Vca);
Vx3=max(Vx2,Vba);
Vx4=max(Vx3,Vcb);
```

```
Vx5=max(Vx4,Vac);
Vmax=Vx5;
Vdc=Vmax;
subplot(2,1,2)
plot(t,Vdc);      % the output voltage is plotted
grid on;
axis([0 40e-3 0 350])
xlabel('time (in sec)');
ylabel('ouput voltage(V)');
```

结果如图 3-56 所示。

二极管桥式整流电路只能使电流从直流母线正极流向负极。因此，功率只能从交流侧流向直流侧，是单向变换器。在开关可控的整流器中，开关可以在任意期望时刻导通，整流器可将功率从直流侧反馈回到交流侧，形成双向变换器。

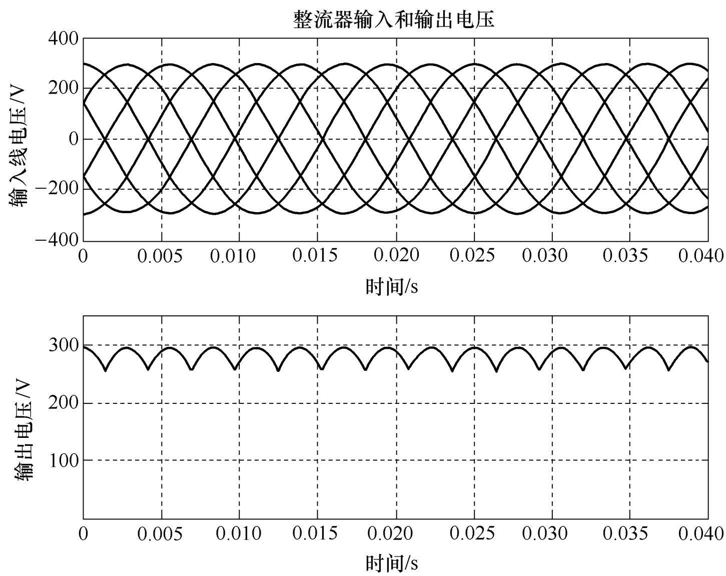


图 3-56　仿真结果

3.10　脉宽调制整流电路

PWM 变换电路由于具有提高和调整直流电压、改变输入功率因数和输入电流谐波控制的能力，所以广泛应用于三相 AC/DC/AC 系统中。一般来说，直流母线电压包含明显的二次谐波分量，这会影响变换器电压控制环，特别在控制增益很大

的情况下。三相 AC/DC/AC 电压坚挺的系统包括首末端整流器，含电容器的直流母线和广泛应用在电动机驱动、在线式不间断电源（UPS）、分布式发电系统中的逆变电路。其中整流电路控制器为双反馈环控制：电压外环和电流内环，电压调节器产生电流指令，调节电流和控制功率因数。正常运行条件下，作为分布式发电系统中的直流电源，稳态直流母线电压应在直流储能元件的支撑下保持额定值上叠加可接受的一定变化范围之内的波动。然而，一旦逆变器对负荷周期性变化或不平衡做出响应，它的输出功率会产生变化，不再保持恒定，就会引起直流母线电压波动。有两个控制问题需要注意。第一是储能系统须保持直流电压变化在可接受的范围之内。第二是控制逆变器输出到电网的有功和无功功率。图 3-57 给出了整流器直流母线电压的控制框图。

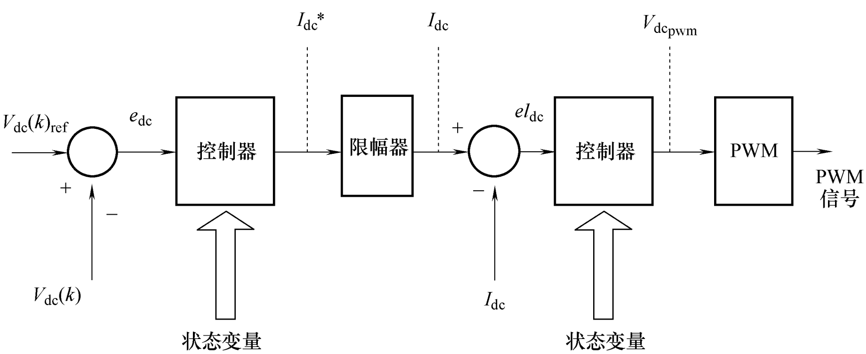


图 3-57　整流器直流母线电压控制框图

控制器的第一控制目标是使直流母线电压最小。第二控制目标是提高整流-逆变系统输入输出功率的瞬时平衡，减少直流母线电容，以降低成本。直流电容容量越小，保持功率平衡性能越好。但这仅适用于平衡负荷。一旦变换器负荷不平衡，则逆变器稳态输出功率不再保持恒定，输入直流功率也同样。由于直流母线电容的存在，整流侧稳态功率可与逆变侧功率解耦，并控制其在一定范围内，不受逆变侧功率波动的影响，从而平衡首末端的三相输入电流。

图 3-58 所示为一个微电网分布式发电（Distribution Generation，DG）系统。在此分布式发电系统中，变频电能由风电场或高速微型汽轮机产生。产生的交流电被整流，并通过大功率密度电容或储能元件存储。

分布式发电系统的控制目标是消除逆变器不平衡负荷对前后输入电流的影响，保持功率因数为 1，在负荷扰动时快速调节直流母线电压。

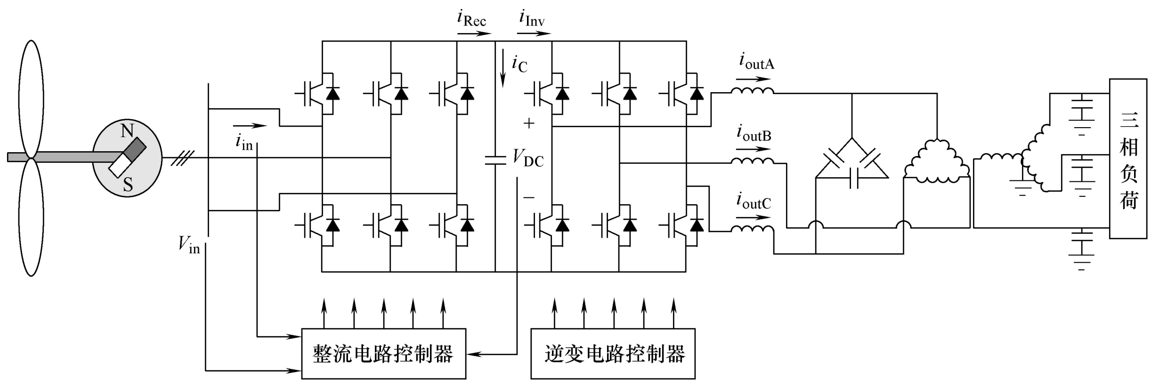


图 3-58　风力发电机组三相 AC/DC/AC 系统拓扑图

3.11 使用正弦 PWM 开关技术的三相电压源整流器

下面基于一相来分析整流器的运行情况。$V_{PWM,a}$的基波分量如图 3-59 所示。如果变换器电压 $V_{PWM,a}$比电压 V_{AN}滞后，角度为 δ，则 AC/DC 变换器运行在整流模式。这使电能从交流侧流向直流侧，如图 3-60 简化等效电路，可使用功率传输公式：

$$P = \frac{V_{AN} \cdot V_{PWM,a}}{X}\sin\delta \tag{3-78}$$

式中，V 为基波电压方均根值。通过控制基准正弦波的相位移控制功角 δ。例如，通过设置 $V_{PWM,a}$的基波分量使基准电压滞后于交流电压源某个角度，它就会滞后于交流电源同样的角度。式（3-78）表示电能从交流侧输送到直流母线的条件。调整调制比可以控制 $V_{PWM,a}$的幅值。

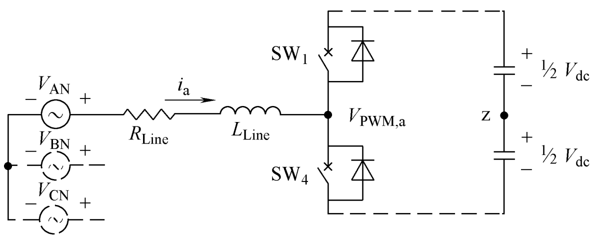


图 3-59　三相 PWM 整流器一个支路的模型

图 3-61 的相量图所示为整流运行模式。调整角度 δ 也可以控制整流器的输入功率因数角 θ。为使功率因数为 1，可以控制 δ 角使相电流和输入电压 V_{AN}同相，如图 3-62 所示。

交流电源的电压和电流如图 3-63 所示。图中电源电流波形放大了 10 倍。图 3-64 为直流电压，图 3-65 为一个支路相对于中性点的 PWM 电压 $V_{PWM,a}$。

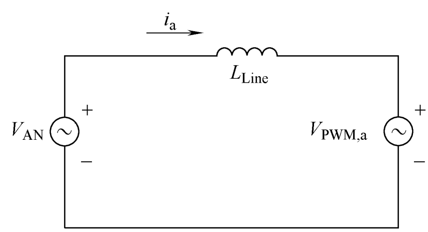


图 3-60　基波电压的单相等效稳态电路

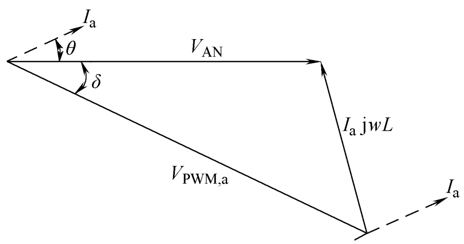


图 3-61　整流运行模式基频相量图

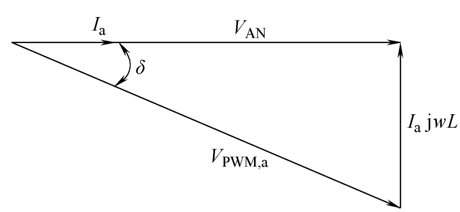


图 3-62　单位功率因数下基波量的整流模式

图 3-63 中的输入电流与电压同相位。在这种运行模式下，整流器工作在单位功率因数。

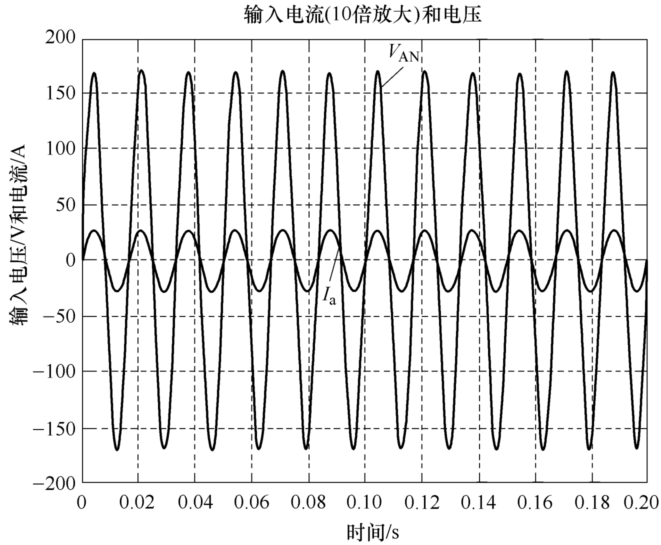


图 3-63　整流器交流基波输入电压和电流波形（例 3.15 的波形）

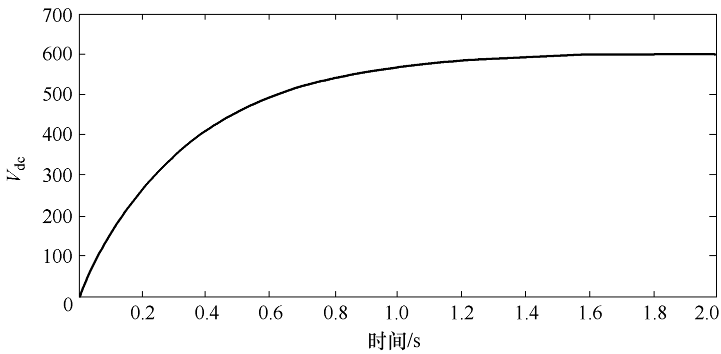


图 3-64　直流输出电压

整流器交流侧电压基波分量有效值 $V_{PWM,a,1}$ 由交流输入电压 V_{AN}、流过其电路的电流和其间的阻抗值 X 决定。$V_{PWM,a,1}$ 和 V_{AN} 之间的关系为

$$V_{PWM,a,1} = V_{AN} - I_a X \tag{3-79}$$

在交流输入电压、电流、功率因数和阻抗给定时，可以计算 $V_{PWM,a,1}$。直流电压值由调制比和 $V_{PWM,a,1}$ 决定。如表 3-4 所示，对于三相整流电路，有

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{PWM,L-n}}{M_a} \tag{3-80}$$

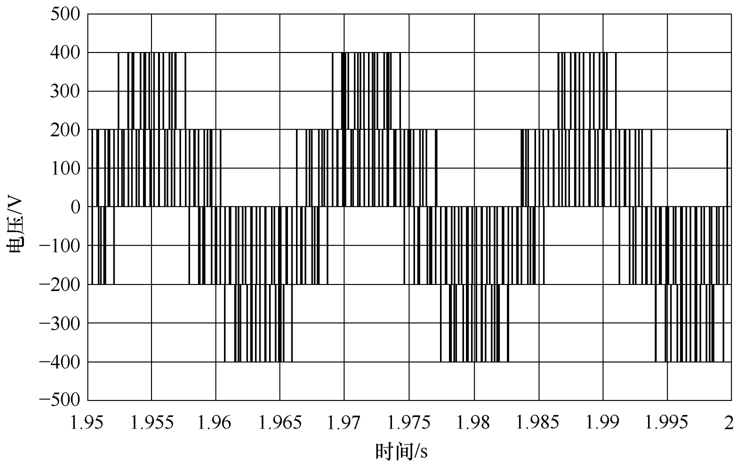


图 3-65　一个支路相对于中性点的 PWM 电压（$V_{PWM,a}$）

表 3-4　M_a、V_{dc}和整流器输入端交流电压值

V_{dc}	$V_{PWM,a,1}$	M_a
604V	128.2V（RMS）	0.6

例 3.15　三相整流电路在表 3-5 系统数据下工作在整流模式。计算 δ 角和直流电压，忽略直流电压谐波。

表 3-5　例 3.15 数据

V_{AN}	f_1	P	X	pf	M_a
120V（RMS）	60Hz	720W	11Ω	1	0.8

解

三相功率为

$$P = 3 \cdot V_{AN} \cdot I_a \cdot \cos\theta$$

因此，相电流为

$$I_a = \frac{P}{3 \cdot V_{AN} \cdot \cos\theta} = \frac{720}{3 \times 120 \times 1}\text{A} = 2\angle 0°\text{A}$$

整流电路的 PWM 输入电压为

$$V_{PWMa} = V_{AN} - I_a X$$

$$V_{PWMa} = 120 - 2\angle 0° \times 11\angle 90° = 120\angle -10.39°\text{V}$$

故 $\delta = 10.39°$。

整流电路的输入端线对中性点电压为

$$V_{L-N,rms} = \frac{M_a}{\sqrt{2}}\frac{V_{dc}}{2}$$

因此，整流直流电压为

$$V_{dc}=\frac{2\sqrt{2}\cdot V_{PWMa}}{M_a}=\frac{2\sqrt{2}\times 122}{0.8}V=431.3V$$

3.12　微电网运行中的逆变器定容

如同前述正弦波-三角波 PWM 调制，可以通过调节调制比控制输出电压幅值。

三相逆变器广泛应用在微电网系统中。逆变器的输入为直流电压，可由光伏电池、燃料电池或变速风电机组等发出的频率变化的交流电压经整流后得到。通常采用正弦 PWM 技术将直流电压转换成交流电压。输出的交流电压通过三角波和正弦波比较得到。输出电压基波分量的幅值由调制比 M_a 决定，M_a 为基准正弦波幅值与三角波幅值之比。输出电压的频率与基准正弦波相同。谐波含量由调频指数 M_f 决定，M_f 为三角波频率与基准正弦波频率之比。电压谐波含量越小越好。为减少谐波，调频指数应足够大。输出交流线电压的基波分量值为

$$V_{PWM,ab}=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\cdot\frac{V_{dc}}{2}M_a \tag{3-81}$$

表 3-6 给出的是在给定直流电压下，产生一定幅值交流电压的调制比变化。逆变电路开关管额定参数选择应考虑直流电压和额定功率下通过的电流。调频指数的选取应考虑开关器件的换流特性。

表 3-6　三相逆变电路（线间）交流电压保持恒定时的调制比

$V_{ac}=120V$	
V_{DC}/V	M_a
200	0.98
250	0.78
300	0.65

除调制比决定输出电压幅度，调频指数决定谐波含量外，调制比对谐波含量也有一定影响。表 3-7 给出了以基波含量为基值的谐波含量标幺值。

表 3-7　输出相电压谐波含量标幺值

谐波次数	$M_a=1$	$M_a=0.9$	$M_a=0.8$	$M_a=0.7$	$M_a=0.6$
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$1\cdot M_f\pm 2$	0.318	0.298	0.275	0.248	0.218
$2\cdot M_f\pm 1$	0.181	0.283	0.393	0.506	0.617

表格第 2 列表明，基波电压幅值为 1，$M_a=1$ 时，$1\cdot M_f\pm 2$ 次谐波幅值为

0.318 即 31.8%（M_f 为调频指数）。例如，若调频指数为 50（基频为 60Hz，开关频率为 3kHz），则 $1 \cdot M_f \pm 2$ 次谐波次数为 48 和 52。也就是 60Hz×48 = 2.88kHz 和 60Hz×52 = 3.12kHz 谐波相对于基波的幅值。类似地，谐波次数为 $2 \cdot M_f \pm 1$ 的幅值为基波电压幅值的 18.1%，即 99 次和 101 次谐波的幅值。这些谐波频率为基频的 99 倍和 101 倍，分别是 5.94kHz 和 6.06kHz。第 3 列给出了调制比为 0.9 时谐波含量相对于基波的值。如果 $M_a = 0.9$，48 次和 52 次谐波将为基波的 29.8%。后面几列给出了不同调制比下的谐波含量。

含量显著或与基频可比的谐波次数一般为 $N \cdot M_f \pm M$，其中 N 和 M 为整数，因此它们的和是奇数。大部分电路都含有 R-L 结构。其中的阻抗值与频率成正比（$X_{L,1} = L \cdot 2\pi f$）。随着电压谐波次数的上升，频率也升高。电抗的谐波阻抗值为 $X_{L,n} = L \cdot 2\pi nf = n \cdot X_{L,1}$。也就是说，谐波阻抗是基波阻抗乘以谐波次数。因此，谐波次数越高，谐波电抗值越大，其电流就越小。故在 M_f 较大时，谐波次数也越高，谐波电流也越小。如果电流谐波含量很小，输出电流就更接近期望正弦波。因此，通常设计采用较高的调频指数。但在实际设计中会有限制。如果采样频率较高，开关每秒的开通和关断次数就会增加，开关损耗增大。此外，如果采样频率过高，开关可能会开通关断不当。因此，需要在谐波含量和开关损耗间加以权衡，选择合适的采样频率。另外，采样频率需选择在音频范围以外。

3.13　微电网运行中的整流器定容

对于二极管桥式整流电路，直流开路电压与输入交流电压成正比。这类整流电路仅用于交流侧频率不重要且直流电压不要求控制的情况。直流电压与交流输入电压成正比。可以把电容连接在直流母线上，以保持直流电压稳定。无电容的开路电压为

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6} \cdot V_{PWMa}}{\pi} \tag{3-82}$$

在实际应用中，交流侧频率保持在一定值时，通常采用 PWM 整流电路。三相正弦-三角波 PWM 整流电路的输出直流电压不仅与调制比有关，还与前述 δ 角有关。整流电路的输入为带有电抗的交流电源，电抗在整流电路和交流源之间。整流电路电压降产生电流；因此整流电路输入端交流电压与交流电压源不同。整流电路输出直流电压与整流电路输入端交流电压成正比，与调制比成反比：

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{PWMa}}{\sqrt{3} \cdot M_a} \tag{3-83}$$

整流器的开关额定值选取至少要等于直流电压，调频指数由开关管换流时间决定。与逆变器类似，采样频率越高，电流谐波含量越少。但采样频率高会使开关损耗增加，还有可能使开关管换流失败。因此，需要在谐波含量和开关损耗间折中考

虑，选择合适的采样频率。

3.14　微电网运行中的直流变换器定容

直流变换器可用于将蓄电池并入微电网。需根据应用情况选取变换电路的类型：升压电路用于升高电压，降压电路用来降低电压，升降压电路既可升高电压也可降低电压。式（3-84）给出了电路的输出。由公式可见，输出电压由开关占空比决定。开关额定电压应为降压和升压变换器的高压侧电压。对于升降压变换器，开关额定电压应高于输入和输出电压中较高的一个。变换器额定电流值应考虑变换器可为蓄电池在规定电流下充电和放电。

$$
\begin{aligned}
V_o &= \frac{V_{in}}{1-D}\text{：升压变换器} \\
V_o &= D\cdot V_{in}\text{：降压变换器} \\
V_o &= \frac{D\cdot V_{in}}{1-D}\text{：升降压变换器}
\end{aligned}
\tag{3-84}
$$

实际上，直流变换器的输出电压不是恒定的。在平均电压上叠加有脉动分量。在理想状态下，恒定电压源的脉动为 0。而实际中，受负荷、输出端电容和开关频率影响，输出电压中肯定含有脉动分量。在负荷一定时，为减小脉动，要采用较高的电容值和开关频率。与逆变电路类似，开关频率由开关损耗以及开关开通和关断的时间决定。需要在输出电压脉动纹波和开关损耗间加以权衡。变换器的额定参数和成本随着电感和电容的增大而增大。因此，需要在输出电压脉动纹波和电感电流以及变换器的额定参数与成本间折中考虑。

习　题

3.1　考虑图 3-66 的微电网系统。三相变压器 T_1 额定视在功率为 500kVA，电压为 220/440V，变压器阻抗为 3.5%。微电网电源为光伏电站的交流母线，它的直流母线电压为 540V。配电线路长 10mile，串联阻抗为 0.1 + j1.0Ω/mile，本地负荷为 100kVA，440V。微电网通过变压器 T_2 与当地电网相连，它的额定电压为 440V/13.2kV，阻抗为 8%。计算微电网系统中的标幺值电抗等效电路。假设当地电网电压为 13.2kV，容量为 500kVA。

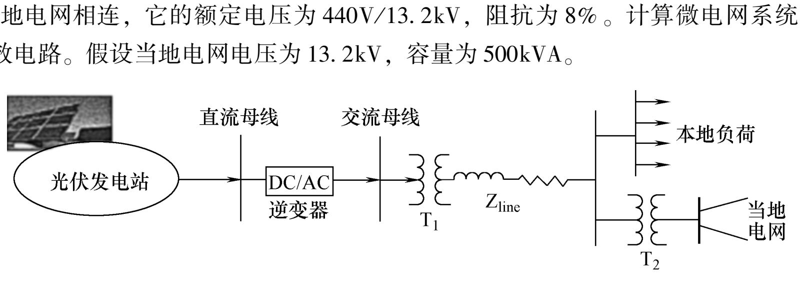


图 3-66　习题 3.1 的系统单线图

3.2　微电网系统如图3-67所示。假设逆变电路交流电压为240V，变压器T_1额定阻抗为5%，额定电压为240V/120V，视在功率为150kVA。变压器T_2额定阻抗为10%，额定电压为240V/3.2kV，额定视在功率为500kVA。本地负荷额定功率为100kVA，功率因数为0.9滞后。逆变器调制比为0.9。

计算：

1）直流母线电压和逆变器额定参数。

2）为达到逆变器直流母线电压所需的升压变换器输入光伏母线电压和电流额定值。

3）微电网光伏电站的容量。

4）微电网标幺值电路图。

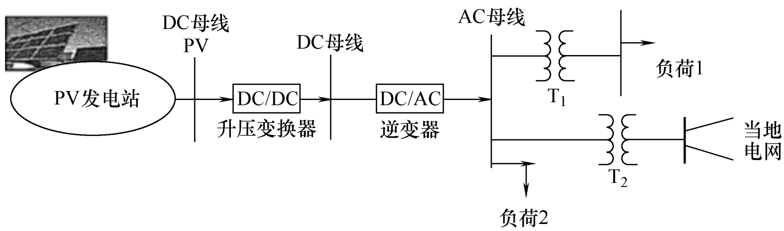


图3-67　习题3.2的系统单线图

3.3　参考习题3.2的图3-67，假设逆变器直流母线电压为800V。变压器T_1额定阻抗为9%，额定电压为400V/220V，额定视在功率为250kVA。变压器T_2的额定阻抗为10%，额定电压为400V/13.2kV，额定视在功率为500kVA。负荷1为150kVA，功率因数为0.85滞后。负荷2为270kVA，功率因数为0.95超前。

计算：

1）调制比和逆变器额定参数。

2）为达到逆变器直流母线电压所需的升压变换器光伏母线电压和输入电流额定值。

3）微电网光伏电站的最小容量。

3.4　参考习题3.2的图3-67。假设变压器T_1额定阻抗为5%，额定电压为440V/120V，视在功率为150kVA。变压器T_2额定阻抗为10%，额定电压为240V/3.2kV，视在功率为500kVA。逆变器调制比为0.9。选取功率基值为500kVA，电压基值为600V。当地电网内电抗为0.2pu，容量为10MVA，电压为3.2kV。假设微电网系统为空载。

计算：

1）系统标幺值阻抗的等效电路。

2）逆变器交流母线发生三相对称故障时的故障电流。

3.5　微电网系统如图3-68所示。三相变压器额定阻抗为3.5%，额定电压为440V/3.2kV，视在功率为500kVA。光伏电站为系统电源。配电线路长为10mile，串联阻抗为0.01 + j0.09Ω/mile。本地负荷为250kVA。系统通过一个3.2/13.2kV变压器接入当地电网，阻抗标幺值为8%。假定当地电网侧的电压基值为13.8kV，功率基值为500kVA，DC母线电压为800V。

计算：

1）逆变器和光伏电站的额定参数。

2）微电网系统标幺值阻抗的等效电路。

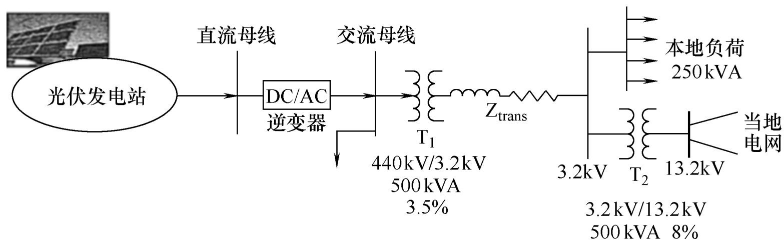


图 3-68　习题 3.5 的系统单线图

3.6　微电网系统如图 3-68 所示，数据与习题 3.5 相同。在 13.2kV 和 500kVA 基值下，当地电网等效阻抗约为 9%，直流电压为 880V。

计算：

1）逆变器调制比和额定参数。

2）逆变器交流母线三相短路时的交流母线上的短路电流；忽略光伏电站短路电流的影响。

3）与 1）相同，但假设光伏电站和逆变器的内电抗以逆变器额定参数为基值的标幺值近似为 1pu。

3.7　三相 DC/AC 逆变器的直流额定电压为 600V。假设直流电压可通过斩波降为 350V。计算交流电压范围和相应的调制比。

3.8　假设三相整流器在表 3-8 的系统数据下工作在整流模式。

表 3-8　习题 3.8 的数据

V_{AN}	f_1	P	X	pf	M_a
120V（RMS）	60Hz	1500W	15Ω	1	0.85

1）计算 δ 角和直流电压，忽略产生的谐波。

2）编写 MATLAB 程序，画出算得的整流模式下的电流 I_a 和电压 V_{AN}。设 V_{PWMa} 和 δ 角的值与 1）相同。假设 PWM 电压由交流输入计算得到。忽略产生的谐波。

3.9　三相整流电路的交流电源相电压为 120V，交流电源和电路交流端的电阻为 11Ω。编写 MATLAB 程序，画出当输入功角 δ 在 $-60°$ 和 $60°$ 之间变化时，保持直流电压在 1200V 的调制比的值。假设系统提供的有功功率为 5.5kW 不变。

3.10　编写 MATLAB 程序，利用傅里叶级数生成三角波 V_T。设三角波参数为：峰值电压 48V，频率 1kHz，谐波次数≤30。画出波形图。

提示：$V_T(t)$ 可用三角波的傅里叶级数生成。这种方法的优点是可以生成长时间的波形。傅里叶级数的方程和解答可以在很多网站上找到。要注意三角波为奇对称，因此 $a_0=0$，$a_k=0$。

傅里叶级数表达式为

$$F(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k\cos(k\cdot\omega t) + b_k\cdot\sin(k\cdot\omega t)$$

$$F(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k\cdot\sin(k\cdot\omega t)$$

需要计算的是 b_k 的值。然后三角波函数可以分段考虑来求解 b_k，类似于第一种方法。

形成三角波的公式已在 3.5.1 节中讨论。

$$b_k=\frac{-8\cdot(-1)^k}{k^2\cdot\pi^2}\sin\left(k\cdot\frac{\pi}{2}\right)$$

现不采用前述公式，而用下式代替三角波表达式：

$$F(t)=A\cdot\sum_{k=1,3,5}^{\infty}\frac{-8\cdot(-1)^k}{k^2\cdot\pi^2}\sin\left(k\cdot\frac{\pi}{2}\right)\cdot\sin(k\cdot\omega t)$$

式中，A 为幅值。可将上式编入 MATLAB 程序。

此表达式可以用 MATLAB 仿真描述变换器运行过程。

例如，设定频率、采样时间和幅值如下：

$$f_s=5000;\ T_s=\frac{1}{f_s};\ V_{Tmax}=48$$

要显示全部波形，步长至少是采样时间 T_s 的一半，并在此上降低 10 倍以得到足够的数据点。

$$t=0:T_s/20:10$$

用以上参数可以使 MATLAB 程序生成 10s 的波形。用循环语句重复等式，利用级数 $\sum_{k=1,3,5}^{\infty}$ 将其加到一起。

3.11　用恒等式法编写 MATLAB 程序产生三角波。假设峰值电压为 48V，频率为 1kHz。画出波形图。

3.12　编写 MATLAB 程序仿真图 3-69 所示逆变器的运行。假设 V_{idc} 为 560V，$V_{C(max)}$ 为 220V，f_e 为 60Hz，调制比 $0.5\leqslant M_a\leqslant1.0$，调频指数 M_f 从 2 到 20 变化。

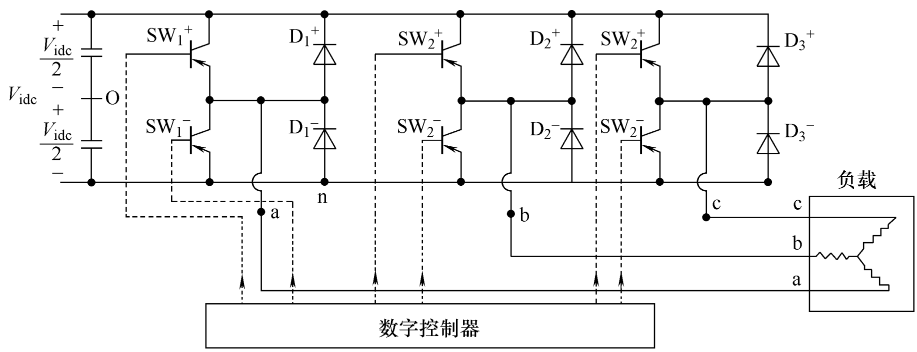


图 3-69　三相逆变器线性和过调制运行

求解下列问题：

1）线电压基波有效值与输入直流电压之比（$V_{(line-line(RMS))}/V_{idc}$）。

2）画出 $M_f=2$ 和 $M_f=20$ 时，$V_{(line-line(RMS))}/V_{idc}$ 与 M_s 的关系曲线。

3.13　单相逆变器直流电源为 60V 光伏。逆变器为 4 开关，采用单极性整流方式，将直流电转换成 50Hz 交流电。选择以下调制比和调频指数：

1）$M_a=0.5$，$M_f=7$。

2）$M_a=0.5$，$M_f=10$。

3）$M_a=0.9$，$M_f=4$。

编写 MATLAB 程序，生成逆变器输出电压 V_{an}、V_{bn}、V_{cn} 波形。以表格形式列出并分析结果。

参 考 文 献

1. Keyhani A, Marwali MN, Dai M. Integration of green and renewable energy in electric power systems. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
2. Mohan N, Undeland T, Robbins W. Power electronics. New York: Wiley; 1995.
3. Rashid MH. *Power electronics, circuits,* devices and applications. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Pearson Prentice Hall; 2003.
4. Enjeti P. An advanced PWM strategy to improve efficiency and voltage transfer ratio of three-phase isolated boost dc/dc converter. Paper presented at: 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics; Feb 24–28, 2010; Austin, TX.
5. Dowell LJ, Drozda M, Henderson DB, Loose VW, Marathe MV, Roberts DJ. ELISIMS: comprehensive detailed simulation of the electric power industry. Los Alamos National Laboratory, Technical Rep. No. LA-UR-98-1739. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory.

第 4 章　智能电网系统

4.1　引言

现今的电网最初是在 19 世纪初设计的，如今已经演变成通过输电线路系统连接成千上万个发电站及负荷中心的大型互联网络[1-3]。电力系统设计基于电网负荷中心的长期负荷预测，后者是根据电网服务的社区的预期需求而发展起来的。为了反映电网实时运行的特点，开发了系统分析模型。在智能电网系统中，大量微电网作为互联电网的一部分在运行，例如具有当地储能系统及负荷的住宅光伏系统（PV）应该是智能电网系统中最小的微电网之一[4]。为了理解未来智能电网设计和运行的新模式，就需要理解当今电网的运行和设计成本[4-5]。

本章将引入传感、测量、集成通信、智能电表及间歇性电源的高穿透率绿色能源等基本系统概念。本章还将引入发电机运行、潮流、输电线路的潮流限制等基本概念，以及负荷系数计算和它对智能电网及微电网运行的影响。对电网运行基本概念的理解将有助于设计一个从当地电网分离出来、作为独立系统运行的微电网。这些概念将为后续章节中介绍绿色能源微电网的设计打好基础。

4.2　电网运行

电网运行的目标是：以可接受的电压和频率，满足适当的安全性、可靠性及可接受的对环境的影响（对电网设备不造成损害），并以最低成本提供连续的高质量服务[5-6]。

图 4-1 中，箭头方向指出了实现目标的优先顺序。提供环境可接受的、安全、可靠及承担最低成本的高质量服务是电力系统运行的主要目标。然而，在紧急情况下系统运行可以不考虑经济性和环境约束条件（如使用高污染能源），而是关注给电力用户供电的安全性和可靠性，同时维持电网的稳定。

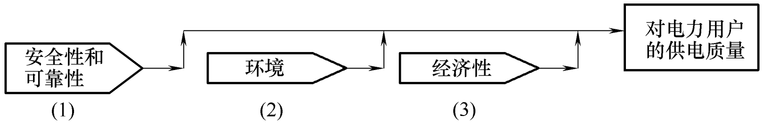


图 4-1　相互关联的电网运行目标

术语连续供电的意思是“安全及可靠的供电”。正像这里所说的，安全意味着一旦发生事故，电网能恢复到它的初始状态，并且提供与事故前质量相同的电能。

例如图 4-2 的电网中，若母线 2 和母线 4 的连接线路停运，如果电力系统仍然能对所有负荷供电，它就是安全的；然而如果它还有足够的备用去应对增长的负荷需求，这个电网就是可靠的。此外，如果图 4-2 的电网遭遇了计划的或非计划的电源停运，却仍然能给用户提供质量符合要求的电能，则它就是可靠的。

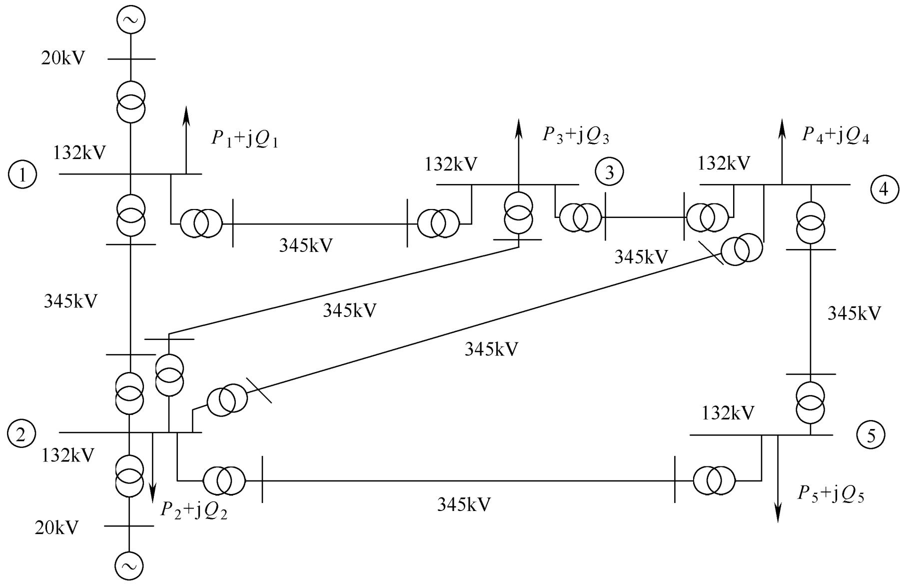


图 4-2　一个五母线电力系统

为保证安全性和可靠性，必须首先规划发电厂的设施和资源，然后进行有效管理。大电网由发电机组、输电线路、变压器和断路器等许多元件组成，随着新的绿色能源接入电网且智能电网落实到位，必须在电网运行中把 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器等附加设备集成进去，并制定它们的运行计划。此外还需评估电力市场结构及实时定价机制[5-6]。

起初，为了给系统负荷供电，对于系统运行的每一秒都需要安排发电计划[6-8]。大电力系统的能源包括水电、核电、化石燃料、风能和太阳能等可再生能源，以及燃料电池、热电联产（Combined Heat and Power，CHP；也称联合发电）和微汽轮机等绿色能源。必须管理和协调这些电源以满足电网负荷的需求。电网负荷需求实际上具有周期特征，一个星期内有日高峰需求，一个月内有周高峰需求，一年内有月高峰需求。必须优化资源以满足每个负荷周期的高峰需求，使得电能生产和配送的总成本最低。

图 4-3 表示每 5min 采样一次的 24h 负荷变化，从图 4-3 可以看出，它的高峰

需求是最小电力需求的两倍。图 4-4 说明高峰电力需求发生在周一，最小电力需求发生在周日，电力系统运行人员必须规划电网的能源和设施以满足负荷变化的情况。

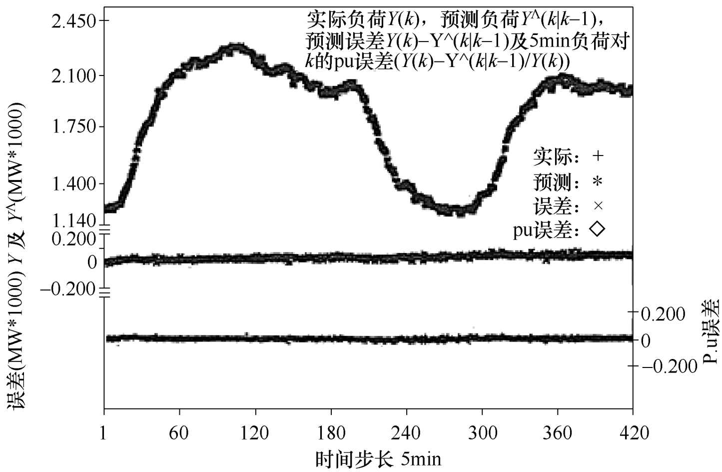


图 4-3　每 5min 采样一次的 24h 负荷变化

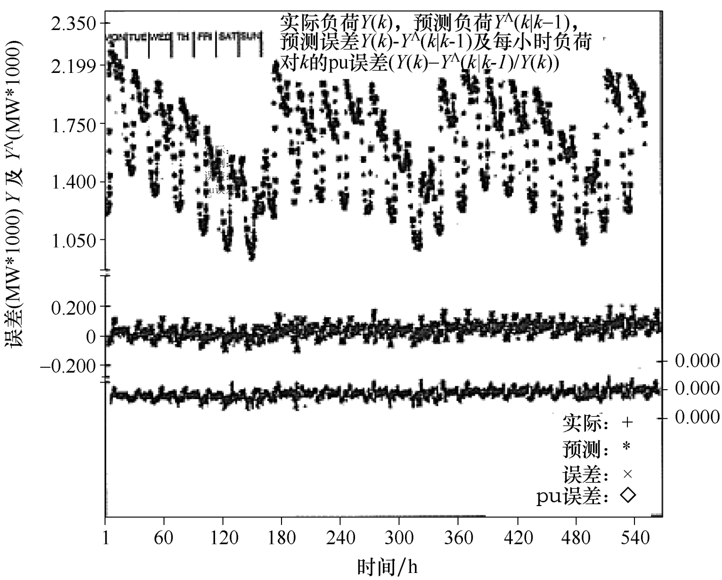


图 4-4　每小时采样一次的周负荷变化

运行计划分为三类任务——长期、中期和短期运行，如图 4-5 所示。这些运行控制涉及对分钟级系统的控制。运行报表系统记录电力系统发生的事件，并通过对所记录数据的分析尝试对影响电网的各种事件做出报表，未来电网的规划中也要使用运行报表数据。

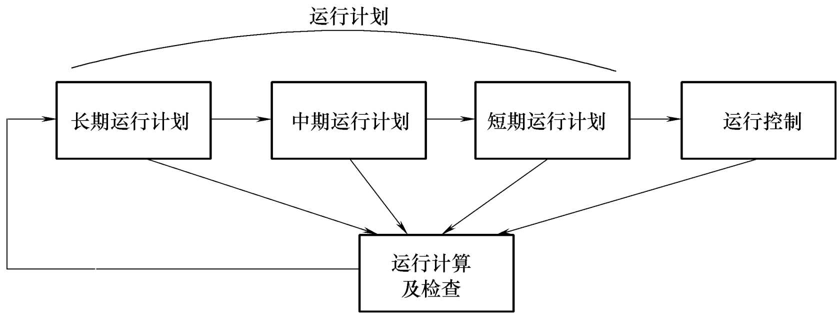


图 4-5　计划调度运行的相关任务[7]

图 4-6 表示了电网运行计划和控制涉及的决策时间。图 4-6 的纵轴表示实现功能的决策时间，横轴表示功能控制的发生位置，这些功能都编制为计算机软件。实现这些功能的硬件包括两台计算机，一台实时运行负责电网监控，第二台作为第一台计算机遇到问题时的在线备用。计算机系统也称为能量管理系统（Energy Management System，EMS）或能量控制中心。图 4-7 所示为已计划安排运行的相互关联任务。

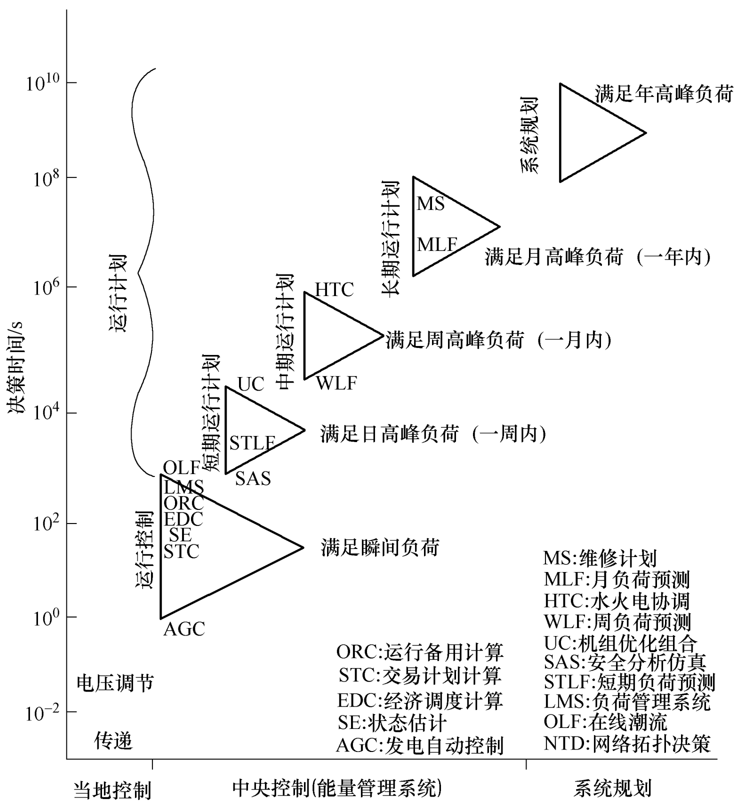


图 4-6　能量管理系统及功能/决策时间

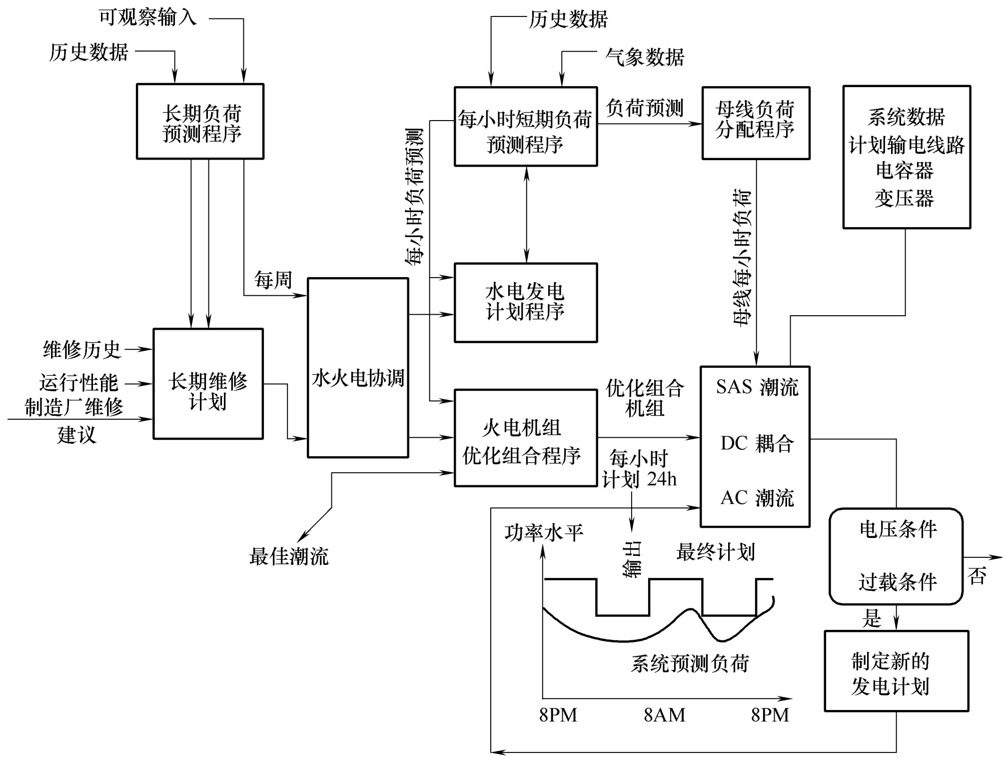


图 4-7　已计划安排运行的相互关联任务

监控和数据采集（Supervisory Control And Data Acquisition，SCADA）系统由数据采集、控制硬件和软件、人机接口软件系统及带有实时操作系统的双计算机系统组成。因此，EMS 由 SCADA 系统及用于电网的运行和控制的应用功能组成。SCADA 系统的主要功能是：①收集整个电网信息；②通过电网通信系统把所收集的信息发送给控制中心；③为电网运行人员显示控制中心的数据，用于决策及决定电网运行的应用功能。作为智能电网设计的一部分，与风能、太阳能、PV 等能源有关的数据，以及来自电力市场的实时定价等附加数据都必须进入 SCADA 系统。为了提高效率和稳定运行，应优化广域分布的智能电网，这也是 SCADA 系统的另一个任务。

运行计划问题可以划分为四个不同的任务：①对所有资源和设施做出年计划；②以月为基础，满足预测的月高峰负荷；③然后利用每周的结果做出日计划；④最后用日计划制定可行且安全的每小时计划。

长期运行计划由两个功能组成：基于每月高峰负荷需求估计的月负荷预测程序和检修计划程序。检修计划程序根据各种条件安排机组检修，例如制造商的检修建议、对发电机、变压器、输电线路等具体设备的检修经验等，以使得月高峰负荷需求在合理的风险范围内得到满足。

以周为基础的资源和设施的计划是通过中期运行计划完成的，此任务由两个功能组成，即周负荷预测程序及水火电协调程序。周负荷预测程序估计一个月内每周的高峰负荷；水火电协调程序确定水电和火电机组运行的最优计划，使火电机组消耗的燃料数量最少，并满足系统的周负荷需求。由于可再生能源固有的间歇性，随着可再生能源在电网中使用的日益增加，运行计划会变得高度复杂。此外，由于实时定价的实施，随着电力用户对每小时定价做出反应，运行计划会变得更加复杂。在智能电网规划运行中这些问题正在受到关注。

以每日为基础的资源和设施计划是通过短期运行计划完成的。短期运行计划由短期负荷预测程序、安全分析仿真程序和机组优化组合程序组成。短期负荷预测程序估计下一个 168h 的每小时负荷需求。机组优化组合程序即经济发电计划，也被称作排序法或预调度。它基于由长期或中期运行计划规定的不同机组的可用性，确定要提交给系统运行的发电机组，以满足下一个 24～168h 的每小时预测负荷。此外，机组优化组合功能决定了火电机组起停的顺序，以保证满足每小时预测的电网负荷的发电能力适度但不过量。应该提及的是，由于负荷预测的不确定性，按惯例，计划的附加容量可以是已同步的或在短期内准备好同步的两者之一，这个超额的容量称作运行备用，后面还要讨论到。安全分析仿真程序是一套面向调度员的交互程序，它用于计算系统负荷母线的电压。短期运行计划的最后一项是安全分析仿真功能。安全分析仿真功能基于机组优化组合程序和每小时母线负荷预测做出的每小时发电计划，计算系统母线电压。如果对于预期每小时负荷、发电计划及预期或已计划的系统结构，计算得

出的运行条件不可接受，就要改变系统配置（如改变变压器抽头或发电计划），并重新进行计算。一旦确定了经济可行的每小时发电计划，已规划的系统运行将传递给运行控制。运行控制要努力满足如前节所描述的系统分钟级需求。在电网规划和运行中，母线负荷计算很重要。它也称为潮流计算，第 7 章将讨论它的作用。

在解除管制的电力市场，许多合同在买卖双方之间提前执行，例如已经开发了基于系统预测负荷需求的日前市场，在合同递送到买方和终端用户至少 24h 之前供电[9-10]。

4.3 纵向组合及市场化结构的电力公司

图 4-8 表示一个纵向组合的电网，它可以追溯到 Thomas Edison 时代[1,2]，它本质上是一个网络结构，大型发电站位于煤炭或水电资源可得之处。电力首先供给大城市的电力用户，然后通过辐射状的配电系统送到农村地区。当今电网的电能流动基本上是单向的——从发电站到居民、商业和工业用户。因为多数发电站都位于有煤炭资源或水电资源的偏远地方，电力必须通过高压输电系统和次输电系统送到终端用户。传输到负荷的功率损耗可通过系统潮流计算来估计，美国 2004 年此项损耗大约超过 265180000000GWh[3]㊀。

如果电网遭遇发电站突然停运，或从发电站到负荷中心承载大负荷的关键线路跳闸，这样的损失会造成电力突然短缺。这会导致系统运行人员不能使电能的生产与需求匹配，从而使电网产生功率振荡。如果系统运行人员不能使电能生产与消费匹配，电网就会失稳，继电保护会将设备切除造成区域停电。

图 4-9 表示一个市场化运作的电网。在这个结构中，独立系统运营商（Independent System Operator，ISO）负责系统运行，ISO 能量管理计算机系统计算维持互联电网可靠运行所必需的运行备用[7-9]。ISO 操作员运行电网的根据是北美电力可靠性理事会（North American Electric Reliability Council，NERC）[9-10]的政策 1 发电控制和性能标准。这份文件规定了运行备用要求[11-19]。根据 NERC 的要求，“每个控制区域的运行电源要具备足够的运行备用，要考虑以下因素：如预测误差、发电和输电设备不可用、发电机组的数量和容量、系统设备强迫停运率、计划检修、调节要求、区域及系统负荷多样性”[2]。如果发生电源或负荷丢失，ISO 操作员应采取适当措施以稳定电网。附加发电的形式是旋转备用[7-9]，

㊀ 译者注：原文如此，但肯定有误。因为据统计美国 2004 年全年的发电量也不过 3.97×10^6GWh，远低于这里给出的损耗数值（2.65×10^{11}GWh）。如果改为 2.65×10^5GWh 可能合理一些，假如前面的有效数字正确的话。

旋转备用定义为已准备好由系统操作员调度的同步发电。旋转备用投入的时间通常是 5 ~ 10min，备用功率也可以是离线待命的形式，以及通过合同规定的由用户中断的负荷。

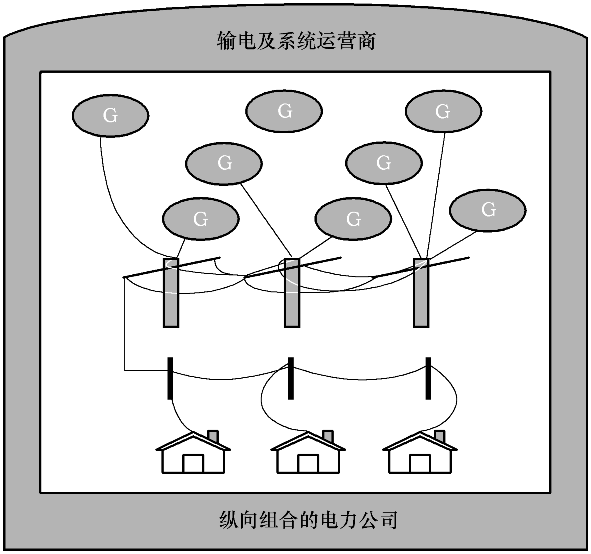


图 4-8　纵向组合的电网

仔细观察电网运行，显然是终端电力用户共同控制着系统负荷。当用户在接通或断开用电装置时就会对系统产生冲击。接通负荷会增加系统发电机的负载，使系统发电机转速下降。系统中发电机转速下降又降低了系统频率；反之，切断负荷会使系统中发电机转速增加，从而提高系统频率。系统运行人员控制系统频率和系统电压，这种控制作用称为负荷跟踪。为作进一步详细阐述，可以说系统运行人员通过监控系统频率对变化负荷做出反应，这个控制作用在负荷频率控制（Load Frequency Control，LFC）下发生[11]。

在市场化结构的电网系统中，ISO 负责控制电网。所有股东、电网公司、独立电力生产者、市政电力公司等都在电力市场规则下运作。为取得最大利润，所有股东都必须研究系统负荷廓线及预期需求。然而，在电力市场中有效利用电力的同时，ISO 在运行电力系统时仍然要保证电力系统稳定性。

本书仅介绍对于理解由许多微电网组成的智能电网十分重要的功能。微电网系统的每条母线（节点）都既有负荷也有电源。为了理解这个概念，我们需要更详细地理解电网的运行控制。

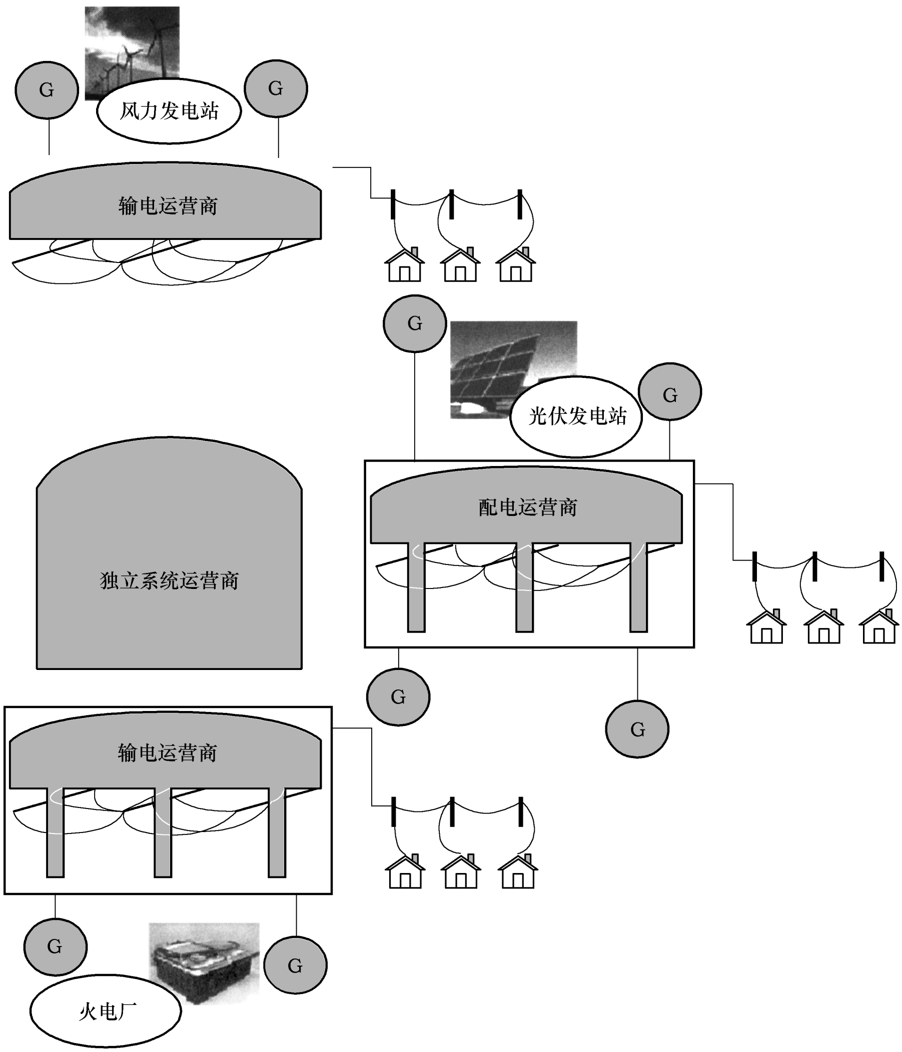


图 4-9　市场结构化的电网

4.4　电网运行控制

运行控制的主要功能是满足秒级及分钟级为基础的瞬时负荷[6-8]，其中的某些功能如下：

1）负荷频率控制（Load Frequency Control，LFC）

2）自动发电控制（Automatic-Generation Control，AGC）

3）网络拓扑确定（Network Topology Determination，NTD）

4）状态估计（State Estimation，SE）

5）在线潮流和意外事故研究

6）交易计划（Schedule of Transactions，ST）

7）经济调度计算（Economic Dispatch Calculation，EDC）

8）运行备用计算（Operating Reserve Calculation，ORC）

9）负荷管理系统（Load Management System，LMS）

运行控制的决策时间，从 LFC 中不到一个周波的动态响应到对于自动发电控制的 1 ~ 10s，对于经济调度计算的 5 ~ 10s；最长是对于负荷管理系统的 1s ~ 30min[8-10]。然而，随着智能电网具有高穿透率的可再生绿色能源和配备智能电表系统，遇到的电力系统会更加复杂。下面几节将研究 LFC 功能和自动发电控制，随后将详细研究网络拓扑的确定及潮流分析。其他功能将留给读者使用本章末尾的参考资料及互联网资源[1-4]自己学习。

4.5　负荷-频率控制

LFC 也称为调速器响应控制环，如图 4-10 所示。一旦电力系统负荷需求增加，发电机转速就降低，从而降低了系统频率；同样，当系统负荷需求减少时，发电机转速增加，因此提高了系统频率。为了维持电网稳定必须持续进行电力系统频率控制。

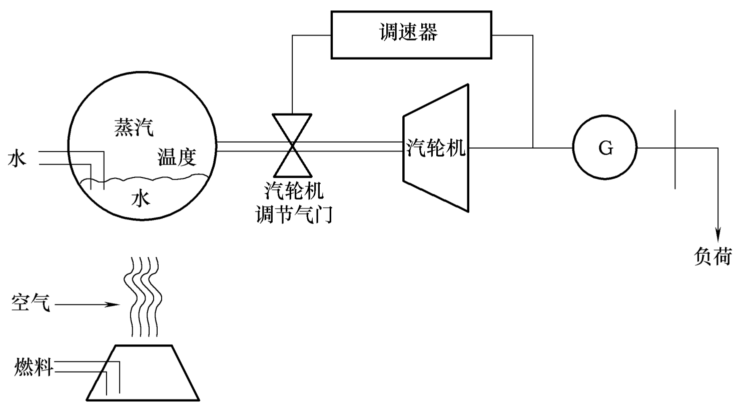


图 4-10　调速器控制系统[11]

在交流电网中，所有电源都并联运行并把所有发电功率注入电网，这意味着所有电源在相同系统频率下运行。美国的系统运行频率是 60Hz，世界其他地区是 50Hz[㊀]。发电机运行在系统频率下，它们都以相同的同步转速同步运行，所有发电功率都注入电网。同步转速可以由下式计算：

㊀ 译者注：实际上，额定频率采用 60Hz 的国家不止美国一个，美国之外的国家也并非都采用 50Hz。大致情况是：南北美洲国家多采用 60Hz；亚洲、欧洲、大洋洲和非洲国家多采用 50Hz，但都有不少例外。

$$\omega_{syn} = \frac{2}{p}\omega_s \tag{4-1}$$

式中，$\omega_s = 2\pi f_s$，f_s 为系统频率，用每分钟转速（r/min）表示，可以表示为

$$n_{syn}(r/min) = \frac{120f_s}{p} \tag{4-2}$$

式中，p 为极数，f_s 为发电机频率。因此，对于一个运行在 60Hz（$f=60$Hz）、两磁极的发电机，机轴以 3600r/min 旋转。如果原动机转速较低，如水电机组，发电机磁极数更多。例如若 $p=12$ 且机组仍运行于 60Hz，则原动机的转速就是 600r/min。

同步运行意味着电网中的所有发电机以相同的频率运行，且所有电源都并联运行，即所有发电机组都运行在系统频率下，与每个原动机的转速无关。交流系统中，电能不能存储，只能在系统的电感和电容之间交换、在负荷中消耗。因此，为了使交流系统运行在稳定频率下，交流电源产生的电力必须等于系统的负荷。然而，系统中的负荷是由电力用户控制的，即当关灯时减小了系统负荷，开灯时增加了系统负荷。对于负荷变化的响应，系统是通过存储在转子中巨大质块的惯性能量平衡的。而在每个瞬时，供给电网的电量与负荷消耗的电量加损耗平衡，这个概念可由下式表达：

$$\sum_{i=1}^{n_1} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{n_2} P_{Li} + P_{losses} \tag{4-3}$$

式中，P_{Gi}是发电机 i 发出的功率，P_{Li}是负荷 i 消耗的功率，n_1 是系统中发电机的数量，n_2 是系统中负荷的数量，输电线路损耗记为 P_{losses}。

正如所预期的，当时刻 t 系统负荷需求增加时，系统频率预计会降低，因为系统在这一时刻会比在时刻 $t\text{-}k$ 有更多负荷，这里 k 为时间步长，事实上这正是最开始发生的事情。但系统中有称为负荷-转速控制的反馈环。当系统频率下降，即原动机机轴转速降低时，反馈环会增加输入功率以使系统发电与系统负荷匹配，这称为调速器系统控制：为增加输入功率，调速器增大调节气门开度，使发电机轴加速。无论如何，随着系统负荷的增加，所产生的附加功率使得系统的发电与系统的负荷相匹配，系统仍以其同步转速运行。

调速器控制使汽轮机轴转速保持在期望的同步转速不变，以使系统以同步频率发电。为了保证锅炉和汽轮机的安全，锅炉控制系统控制用蒸汽压力和蒸汽温度表示的蒸汽参数。锅炉控制系统控制调节气门到期望位置，以使蒸汽压力和温度在其规定范围内。图 4-11 所示为锅炉控制系统。当系统负荷变化时，调速器反馈控制了汽轮机轴的转速，调速器反馈增大或减小调节气门开度，而增大或减小调节气门开度由蒸汽参数决定，只要锅炉蒸汽参数在期望范围内，调节气门就可以不动作。

系统发电与系统负荷匹配由两种控制方法实现，即汽轮机跟踪控制和锅炉跟踪控制。汽轮机跟踪控制中，汽轮发电机负责控制节流阀压力，控制调节气门在规定

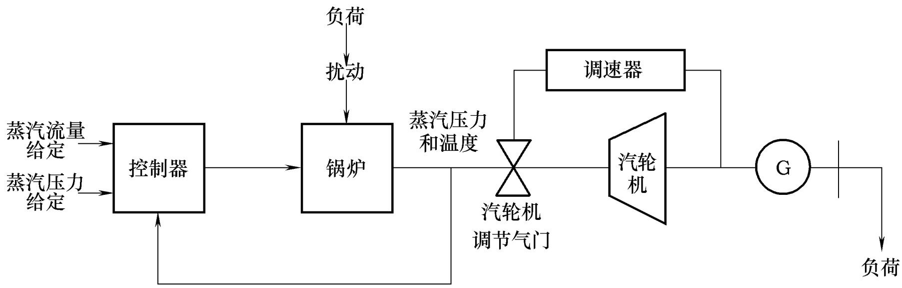


图 4-11　锅炉控制系统[11]

范围内保证蒸汽参数，即蒸汽压力和温度在安全范围内。负荷功率需求对应于蒸汽流量需求，由锅炉控制。当发出阶跃增加负荷控制命令时，这个控制命令发给锅炉，锅炉控制系统则增加燃料比、给水和送风量，即增加节流阀压力。节流阀压力改变由汽轮机控制系统测量，调节气门由汽轮机控制系统控制。增大调节气门开度增加蒸汽流量，增加发电机的有功出力。注意，当调节气门开度增大、蒸汽流量增加时，汽轮机轴加速，但因发电机与电力系统同步且系统负荷已经增加，所产生的有功功率注入到电力系统中，系统负荷与发电之间建立了新的平衡，因此维持了系统频率，所有并网的发电机都以同步转速运行。

在锅炉跟踪控制中[11]，锅炉负责控制节流阀压力，有功负荷需求由汽轮发电机控制。在这种控制模式中，由负荷需求的阶跃变化引起的发电阶跃增加直接反映到调节气门。负荷需求增加时，调节气门开度增大，蒸汽流量及发电机的有功出力增加。然而，锅炉正在控制节流阀压力，如果压力减小超出锅炉调节范围，为维持压力，锅炉控制系统就认为汽轮机的控制行为无效。上面提出的两种控制系统都能够给出满意的控制，锅炉跟踪控制响应较快、应用广泛；汽轮机控制系统响应较慢，但它能对锅炉提供保护，并能在锅炉获得能量之前确保蒸汽达到要求的参数。

从电力系统稳定运行考虑，除频率控制外，还必须控制发电机机端电压及功率因数。图 4-12 表示了蒸汽轮机-发电机的电压调节器。正如前面指出的，调速器控制汽轮机的调节气门，即控制进入汽轮机的蒸汽流量。进入汽轮机的蒸汽流量是发电机轴上的一次机械功率。图 4-12 也示出了位于发电机转子侧的发电机励磁系统。发电机机端电压由电压调节器控制，励磁电压基于调节器设定值（V_{ref}）加在发电机励磁绕组上。

通过把机械功率施加到由直流电流供电的转子绕组上，电机气隙中建立了时变磁场，基于法拉第电磁感应定律，定子绕组内产生感应电压，又因为发电机与电力系统同步，功率注入系统。图 4-13 表示了在蒸汽发电厂运行方面必须理解的主要概念，发电机是三端设备，通过调整发电机的磁场电流来调整发电机的机端电压。

$$E = K \cdot I_f \cdot \omega \tag{4-4}$$

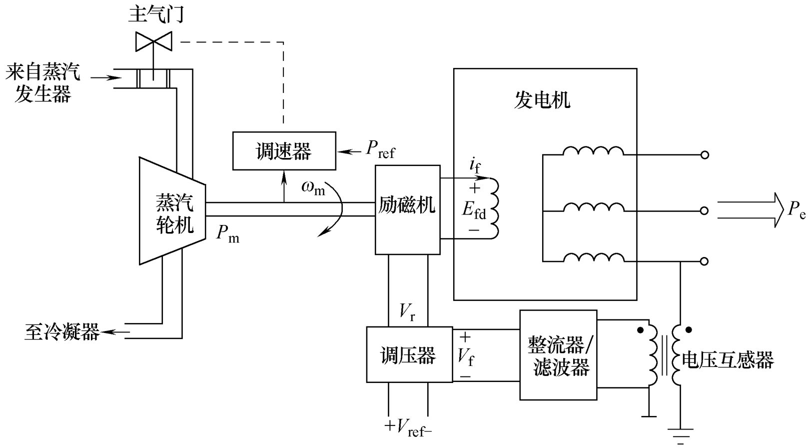


图 4-12　蒸汽轮机-发电机的电压调节和汽轮机调速器控制

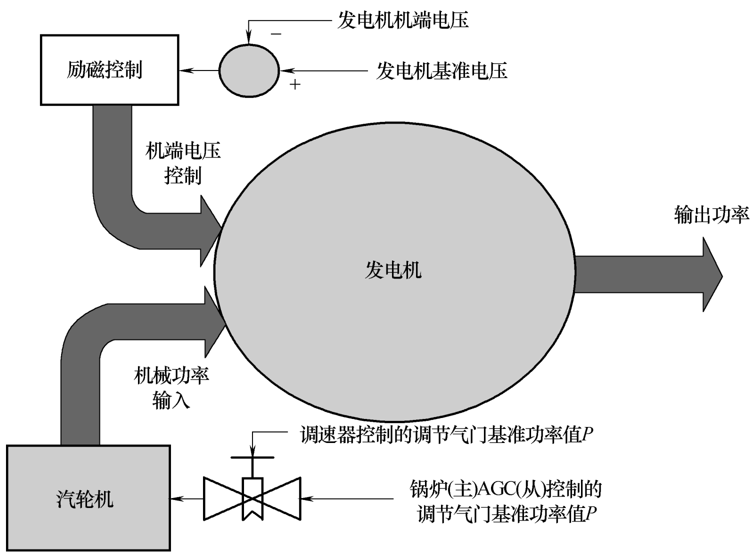


图 4-13　视为三端设备的发电机

开路感应电压 E 是与电机规格有关的变量，由常数 K、磁场电流 I_f 和轴转速 ω 决定。

通过调整励磁电流，发电机可以运行在超前或滞后功率因数，本章稍后部分将研究这个概念。然而，由发电机发出的无功功率 Q_G 必须等于全部无功负荷及输电线路的无功损失之和。

$$\sum_{i=1}^{n_1} Q_{Gi} = \sum_{i=1}^{n_2} Q_{Li} + Q_{losses} \tag{4-5}$$

式中，Q_{Gi}是发电机 i 发出的无功功率，Q_{Li}是负荷 i 消耗的无功负荷，Q_{losses}为无功损失[㊀]。

这里正式引入在电力系统规划、设计和运行中两个重要的分析研究。

1）潮流研究。对于给出的计划系统发电和系统负荷，以及计划的输电线路和变压器等系统元件，计算系统的母线电压和输电线路潮流。这些条件由式（4-3）及式（4-5）表示。通常把母线电压作为系统状态，表示每条母线上的电压幅值和相角。潮流计算关注系统注入模型，发电机阻抗并不包括在电力系统注入模型中，该模型描述发电机端子注入输电线路网络模型的功率。

2）短路电流研究。对于给定系统模型、母线电压及负荷，计算如果故障发生时可能在系统中流动的平衡及不平衡故障电流。一旦故障发生，基于这项研究计算断路器可能经受的短路电流，这项研究还为整定继电保护系统提供整个系统的故障电流水平。短路电流研究中，必须把电源的输入内阻抗包括在内，因为故障发生时它可以限制故障电流。如不考虑电源的输入内阻抗，故障电流会是无穷大，这是不实际的，因为在电流达到非常大之前，电源就会着火。

现在回到发电机运行。在图 4-13，第 2 个终端把机械功率供给发电机轴，并且建立时变的发电机气隙磁通，气隙磁通链接到发电机定子绕组，产生机端电压。发电机输出功率注入电力系统，注入功率及功率因数由磁场电流及机端电压控制，本章稍后将讨论这个问题。

电力系统运行的动态范围从启动——暂态情况，到稳态运行。电力系统的动态持续时间可能从几个周波到几分钟。当发电机励磁电流被改变到对应一个新电压设定值时，发电机励磁控制系统可能遭受的动态扰动从几个周波到几秒。当电网由于发电机跳闸发生运行中断时，电力系统会出现动态稳定问题，如果电网能够提供所需功率使系统发电与系统负荷平衡，电力系统就能够稳定。例如一台发电机跳闸，电网内的所有机组的调速器将对所需功率的缺失（对应系统频率的下降）做出反应，并将附加功率注入电网以使发电与系统负荷匹配。可以根据对电网的影响辨识不同的动态问题：

1）电气动态和励磁控制可能持续几个周波到几秒。

2）调速器和 LFC 动态过程可以从几秒到几分钟。

3）原动机和供电控制系统动态过程可能持续几分钟，原动机指汽轮机发电系统。

4.6　自动发电控制

上节说明了 LFC 中锅炉和调速器的功能。正如已经指出的，必须随着负荷的

㊀ 译者注：原文的式（4－5）与下面的说明不一致，现已改正。

变化一直调整提供给系统的功率，使系统发电功率与系统负荷和损耗平衡，保持系统运行于额定电压和额定频率。

系统负荷的一般规律是白天缓慢增加、夜晚降低。发电成本并非对所有机组都是相同的，因此会分配更多的发电功率给成本最低的机组。此外，几条线路把一个电网与它相邻的电网连接起来，这些线路称为联络线。联络线的进出功率根据签署的协议控制。当功率通过联络线从一个电力系统输出到相邻的电力系统时，送出功率被认为是负荷；反之，当输入功率时，此功率被认为是发电。通过联络线的潮流控制在双方商定的计划中预先规定，它以安全运行和经济交易为依据。为了控制传输联络线的潮流和系统频率，定义区域控制误差（Area Control Error，ACE）的概念如下：

$$ACE = \Delta P_{\mathrm{TL}} - \beta \Delta f \tag{4-6}$$

式中，

$$\Delta P_{\mathrm{TL}} = P_{\mathrm{sch}} - P_{\mathrm{Actual}}$$
$$\Delta f = f_{\mathrm{s}} - f_{\mathrm{Actual}} \tag{4-7}$$

P_{sch}为两个电力网络间的计划潮流；P_{Actual}为两个电力网络间的实际潮流；f_{s}为基准频率，即额定频率；f_{Actual}为实际测得的系统频率；β为频率偏差系数。

自动发电控制（AGC）（见图4-14）软件的设计目标是

1）使区域发电与区域负荷相匹配，即使联络线功率交换与发电计划和系统频率控制相匹配。

2）将变化负荷分配给各发电机，使运行成本最低。

以上条件也要服从考虑电网安全可能引入的附加约束，如线路或发电站损耗。

第1个目标涉及辅助控制器和联络线偏差的概念，字母β定义为偏差系数，它是一个实施AGC时设置的调整系数。系统负荷的很小变化也会使系统频率产生成正比的变化。因此区域控制误差（$ACE = \Delta P_{\mathrm{TL}} - \beta \Delta f$）可以给出每个区域负荷变化的大致情况，并指导该区域辅助控制器操作汽轮机调节气门。为了得到有意义的调节（即减小ACE至零），系统负荷需求每几秒采样一次。达到第2个目标的方法是负荷每几分钟（1～5min）采样一次，并把变化负荷在不同机组间分配以使运行成本最低。假设在每个经济调度周期内负荷需求保持为常数，为了实现以上目标，几乎所有AGC软件都以机组控制为依据。对于机组i，在时刻K的理想发电状况通常每2s或4s采样一次，由式（4-8）给出：

$$P_{\mathrm{D}}^{i}(K) = P_{\mathrm{E}}^{i}(K) + P_{\mathrm{R}}^{i}(K) + P_{\mathrm{EA}}^{i}(K) \tag{4-8}$$

式中，$P_{\mathrm{E}}^{i}(K)$、$P_{\mathrm{R}}^{i}(K)$和$P_{\mathrm{EA}}^{i}(K)$分别是机组i在时刻K理想发电状况的经济、调节和事故辅助分量。

图4-15b说明了电网控制的存储惯性能量及能量管理时间尺度的概念。发电机组转子中存储的惯性能量把能量提供给高频变化负荷，高频负荷如图4-3所示。简单地说，当用户关灯时，负荷跌落产生高频负荷波动。当然，大量电力用户关灯会

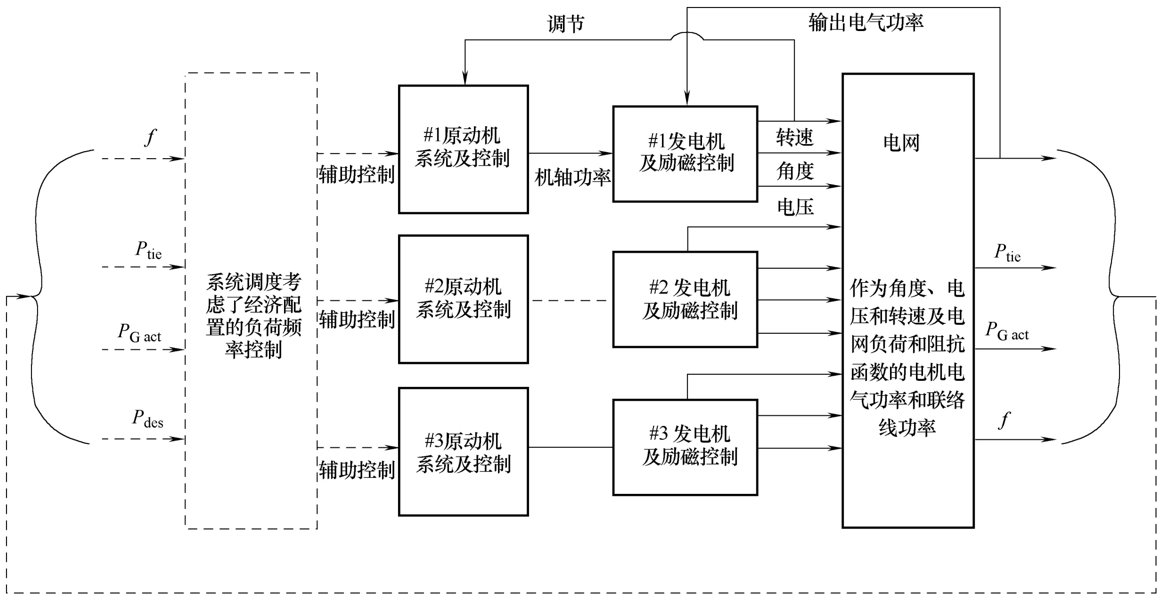
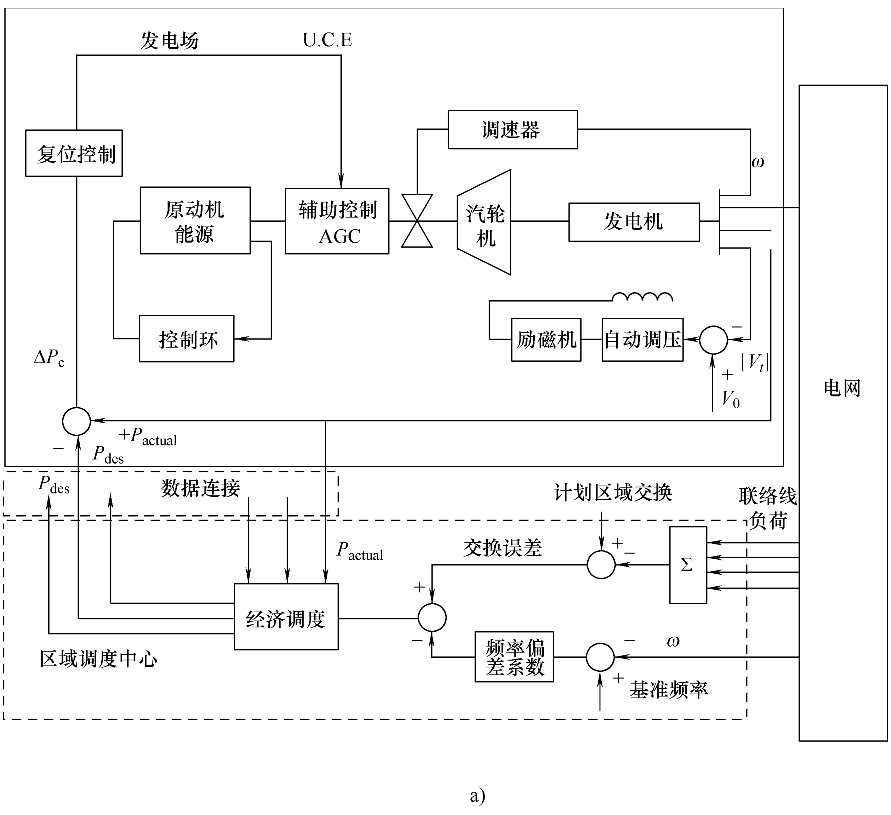


图 4-14　自动发电控制（AGC）

产生高频及低频负荷波动，低频负荷波动有很明显的负荷上升或下降趋势。负荷变化由 AGC 控制，如图 4-15c 所示。AGC 及系统运行人员跟踪电网负荷。然而，在响应负荷变化时，AGC 控制输入能量进入电网。

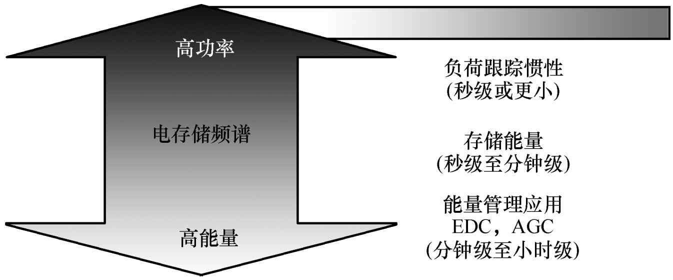
AGC 也控制接入大型互联电网中的微电网，微电网概念表现为一些负荷及光伏发电、风电、热电联产（CHP）等作为单一可控电网运行的微电源。对当地电网来说，这些负荷成为单一可调度负荷。微电网连接到电网时，它的母线电压由当地电网控制，而且它的频率也由电网运行人员控制。微电网不能改变电网的母线电压和电网频率，因此，微电网连接到当地电网时，它就变成了电网的一部分，也会受到电网扰动。为理解这种情况的原因，需要了解电网运行人员使用的控制系统。图 4-15a 描述了原动机、供能（汽轮机或燃气轮机）及调速器（转速负荷控制）系统，这些系统位于发电站。辅助控制及 AGC 控制是当地电网 EMS 的一部分。LFC 系统设计为跟踪系统负荷波动。如前所述，负荷变化时，比如连接到当地电网的微电网负荷增加，存储在系统中的惯性能量释放以补充能量缺额，使发电与负荷平衡，这个能量由原动机供给（存储在转子中），如图 4-15b 所示。为保持当地电



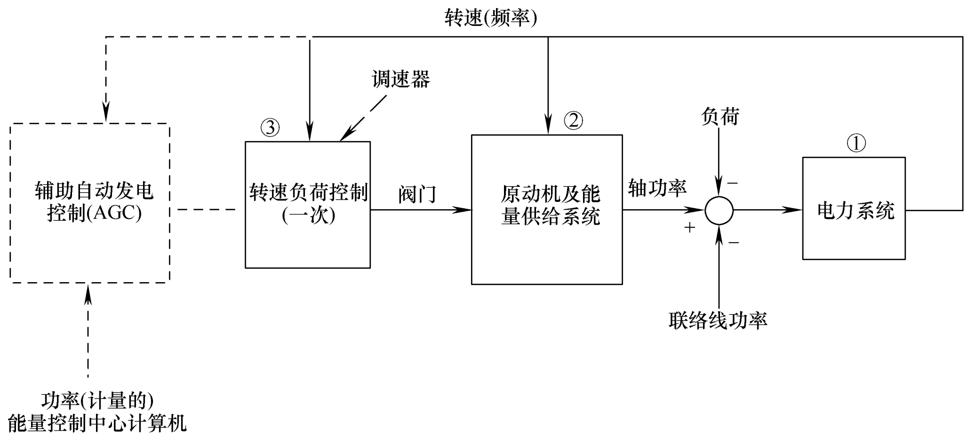
a)

图　4-15

a）含经济调度的负荷频率控制系统示意图



b)



c)

图　4-15（续）

b）电网控制的能量管理系统时间尺度[12]　c）自动发电控制（AGC）框图

网稳定，必须维持负荷与发电之间的平衡，负荷与发电之间的平衡受到扰动时，发电机及负荷的动态响应可能引起系统频率和/或电压变化，如果振荡持续，就会导致当地电网及所连接的微电网崩溃。如果负荷迅速增加、电网频率下降，蒸汽机组增大蒸汽阀开度、水轮机增大水门开度，以供给能量去稳定系统频率，这个动作的发生并不考虑发电机组的发电成本。所有机组都在 LFC 下参与电力系统频率调节，这称为调速器控制，如图 4-15c 所示。AGC 下的辅助控制回路每 1 ~2min 对所有机组进行经济调度以使发电与负荷相匹配，同时使总运行成本最低，因此 AGC 将改变它控制下的发电机的设定值，循环的时间尺度在 1 分钟至几分钟。图 4-15c 中虚线部分包围的是位于当地电网能量控制中心的 AGC。然而当微电网从当地电网断开时，它必须设计成能控制它自身的电压和频率。

智能电网系统和智能电表将使负荷控制变得容易，后续章节将讨论智能电网设计和运行的基本概念。

4.7 运行备用计算

如前面讨论的，只要系统负荷和系统发电之间保持平衡，电网就能稳定运行。运行备用决策基于安全性和必要的可靠性。一旦发生负荷损失或发电机跳闸，为了稳定互联电网的运行，稳定的频率响应至关重要[9-10]。

旋转备用是电网中在运的许多发电机中以兆瓦级分布的大量附加功率。这些机组在 AGC 控制下并且能分配功率以保证系统负荷与系统发电平衡。附加功率的成本应加到供电服务成本中。在未来的电力系统运行中，实时定价及智能计量将允许许多电能终端用户参与提供旋转备用，提高系统整体效率并降低电网运行成本。

4.8 智能电网的基本概念

传统电网中，对电力用户收取固定电价，然而白天高峰负荷期间发电成本最高[15-16]。除了紧急情况下需要降低部分负荷以平衡电网发电外，传统电力系统运行不对负荷进行控制。因此许多设备仅在高峰负荷需求期间短时间内使用，在日常运行期间是闲置的。

为使智能电网系统高效设计和运行，必须安装通信系统、计算机网络、传感器及智能电表等实质性的基础设施，以削减电价最高时的系统高峰负荷。智能电网引入传感、监视和控制系统，借助实时定价机制向终端用户告知任意时刻的电能实时成本。此外，智能计量的高级控制系统给电能用户提供响应实时电价的能力。因此，智能电网为使用可再生绿色能源、及为大都市负荷中心适度应对突发事件提供了平台，它可以预防由于人为事件或环境灾难造成的互联电网完全中断，并允许互联电网解体成更小的区域电网群。此外智能电网能使每个电能用户做出使用光伏、风能、燃料电池及热电联产（CHP）发电的选择而成为电能生产者，并通过智能电表连接买卖电能从而参与电力市场。

美国及许多其他国家的大型电力系统都以巨大的互联电网运行。北美电力可靠性理事会（NERC）[9]的使命是保证美国大电网的可靠性和安全性，图 4-16 表示了北美电力可靠性理事会的地域分布。

同样，人们很自然地期望 NERC 授权的美国电网可靠性中心开发未来的计算机网络控制的智能电网系统。未来计算机网络控制的智能电网系统如图 4-17 所示。

计算机网络融合点（Cyber-Fusion Point，CFP）表示智能电网系统中可再生绿色能源系统接入大型互联系统的节点。美国的互联系统有 8 个区域性可靠性中心，如图 4-16 所示。预计会有很多可再生能源微电网与区域可靠性中心，如可靠性第一公司（RFC）输电系统连接。CFP 是系统节点，它从上游即互联网接收数据，向

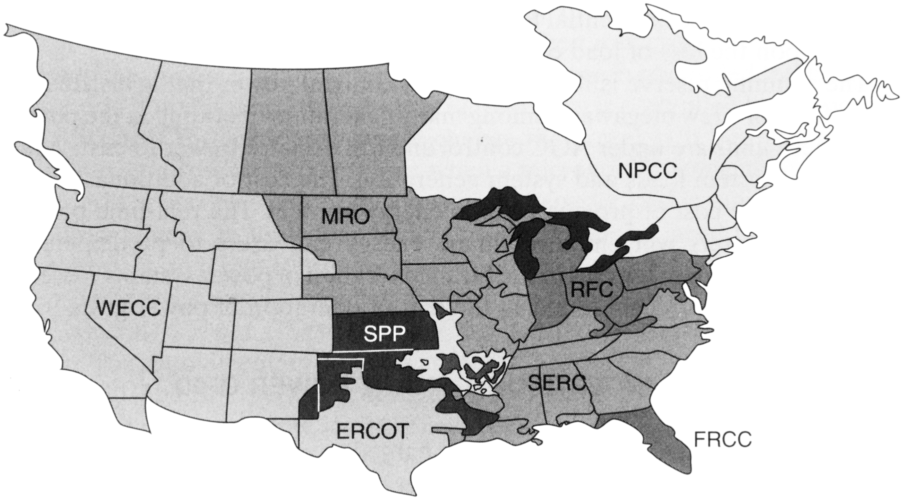


图 4-16　北美电力可靠性理事会（NERC）

ERCOT，德克萨斯州电力可靠性理事会；FRCC，佛罗里达州可靠性协调理事会；MRO，中东部可靠性组织；NPCC，东北电力协调理事会股份有限公司；RFC，可靠性第一公司；SERC，东南可靠性公司；SPP，南方电力联营股份有限公司；WECC，西部电力协调理事会[1-3]

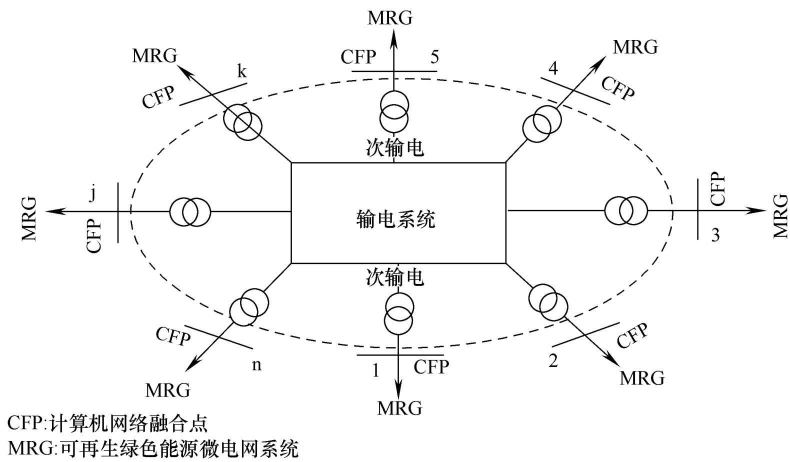


图 4-17　计算机网络控制的智能电网

下游即微电网可再生绿色能源（Microgrid Renewable Green Energy，MRG）系统及它联系的智能电表系统发送数据。CFP 是估计并控制网络状态的系统智能节点，在节点上就如何运行当地 MRG 系统做出经济决策。CFP 也评估 MRG 系统是否应作为一个独立电网系统运行，即作为从大的互联网系统分离出来的一个电网系统运行。计算机网络系统是通信系统的主干网，用以收集互联网系统状态的数据，计算机网络的安全对于电网安全至关重要。图 4-17 表示了这样一个未来的计算机网络

结构化电网。

双向通信是智能电网能量系统的关键特征，它使终端用户基于预期的实时电价调整次要活动的用电时间。从智能电表获得的信息允许电网运行人员更迅速地发现电力运行中断，并随着一天内电价变化平滑地响应实时电价的需求波动[10-15]。

智能电网的计算机网络控制是电气和计算机工程中许多学科研究的课题。它要求控制系统使用分布、自治及智能控制器分析电网特性。计算机网络系统向传感器、智能电网及微电网状态在线学习，控制系统分析系统可能的、即将发生的失效。通过传感器的测量和监视，根据不断变化的运行条件和新设备的实时数据，计算机网络控制系统管理电网行为。随着电价和可靠性的变化，系统使用电子开关控制多重 MRG 系统。

结果，计算机网络控制的智能电网要求消费者支付所生产电力的实时电价。表 4-1 是 2009 年各类电源的成本[3]。

图 4-18 表示 24h 内馈线负荷的变化，其最大负荷是最小负荷的 2 倍。如上章所述，当地电力公司必须使用多种类型的电源使系统发电与系统负荷相匹配。

表 4-1 2009 年发电成本[3]

电源	成本/(美分/kWh)	典型用途	典型装机容量
太阳能（PV）	20 ~ 40	基荷电源	1 ~ 10000kW
微型燃气轮机	10 ~ 15	可用作基荷、峰荷及余热发电	30 ~ 300kW
燃料电池	10 ~ 15	农村（离网）电力 适用于运输基荷	1 ~ 200kW
风电机组	5 ~ 10		5 ~ 10MW
内燃机	1.5 ~ 3.5	技术成熟，历史悠久，可用作备用或峰荷	50kW ~ 5MW
中心发电	1.7 ~ 3.7	基荷/峰荷发电	500 ~ 3000MW

进入该负荷中心的潮流由 345kV 和 138kV 输电系统供电。区域负荷需求由额定值为 138/69/12kV㊀变压器的第二和第三绕组满足。工业负荷以 138/69/23kV 供电。母线负荷是接到 23kV 的变压器一次绕组功率。功率从高压系统流到低压系统。因此，可以把母线负荷定义为 138kV 和/或 345kV 的变压器负荷。

影响负荷需求和实时电价的重要因素是气候及对负荷需求迅速增加的保证。为了把受气候影响的母线负荷分离出来，气候条件正常时使用平均母线负荷；把气候条件在正常水平以上时的数据剔除。图 4-19 是由中西部电力公司提供的一个合成的每小时负荷序列[16]。$\{Y(\cdot)\}$ 的递归均值和方差可用式（4-9）及式（4-10）计算。

㊀ 译者注：原文为 138/69/12，缺计量单位 kV。

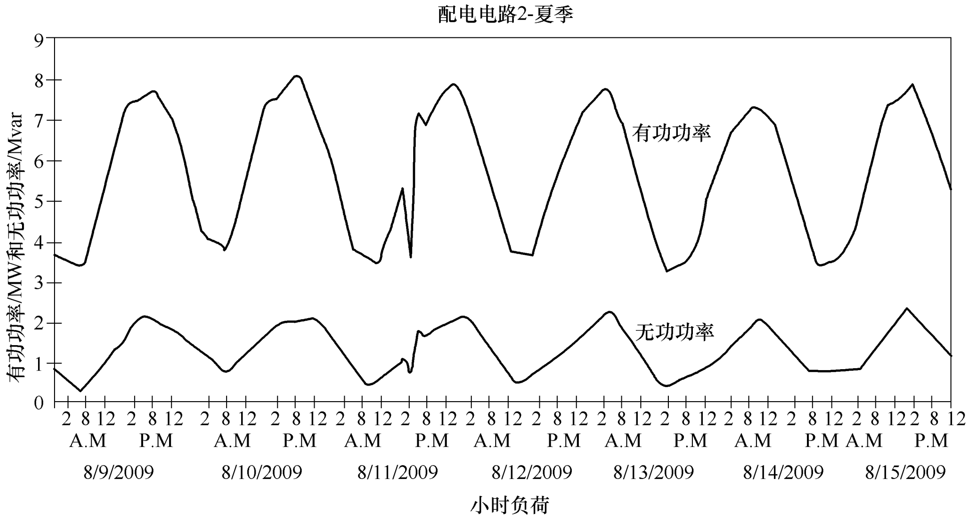


图 4-18　中西部电力公司配电馈线的每小时负荷[7]

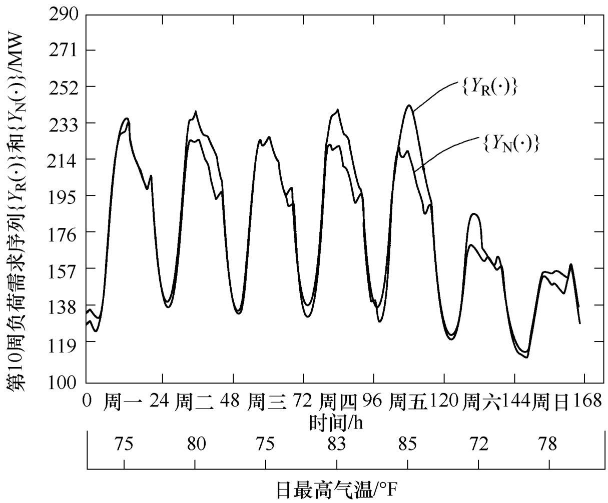
$$\overline{Y}(K+1)=\overline{Y}(K)+\frac{Y(K+1)-\overline{Y}(K)}{K+1} \tag{4-9}$$

$$\sigma y^2(K+1)=\frac{K}{K+1}\sigma y^2(K)+\frac{[Y(K+1)-\overline{Y}(K+1)]^2}{K+1} \tag{4-10}$$

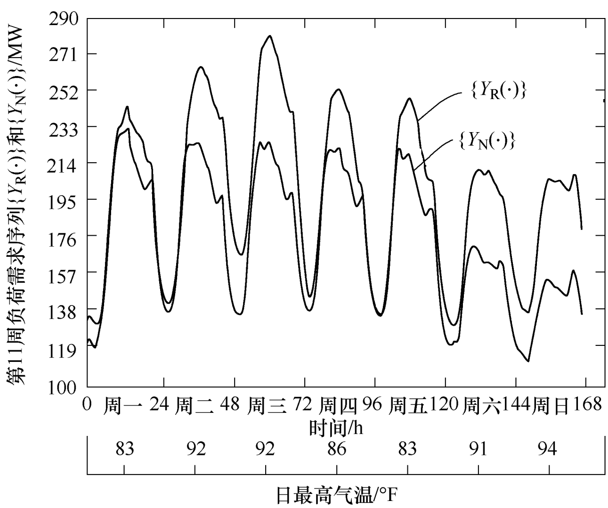
气候对负荷序列的影响、假日及无法预见的情况引起的负荷需求序列会高于或低于给定的正常平均负荷廓线，要从已记录的数据中剔除。剔除由于气候引起的气候影响负荷需求分量 $\{Y_R(\cdot)\}$ 后，会产生一个新的序列，记为正常负荷序列 $\{Y_N(\cdot)\}$。气候条件对负荷的影响与温度、湿度、风速和辐照度有关。然而为了说明基本概念，图中仅使用了温度加权平均、最高和最低温度。因此这里气候条件对负荷的影响仅用温度表示。每天当温度 T 超出舒适范围 $T_{min}<T<T_{max}$ 时，对气候敏感的负荷就表示出来。这里 T_{min} 和 T_{max} 分别是舒适温度范围的下限和上限。当温度在舒适范围内，而且没有发生断电或特殊事件，不会引起负荷突然变化时，就意味着正常的、非气候敏感负荷序列 $\{Y_N(\cdot)\}$ 等于序列 $\{Y_R(\cdot)\}$。

图 4-19 示出了第 10、11、12 及 13 周的母线负荷序列 $\{Y_R(\cdot)\}$ 和 $\{Y_N(\cdot)\}$。可以看出，当每天气温正常时，气候敏感负荷序列 $\{Y_R(\cdot)\}$ 和正常负荷（非天气敏感）序列 $\{Y_N(\cdot)\}$ 的每周廓线大体相同。而日气温较高时，气候影响负荷会叠加到 $\{Y_N(\cdot)\}$ 序列上。

计算方法的根据是计算气温和记为 Y_{PW} 的纯气候影响负荷分量两者的平均关系。序列 $\{Y_{PW}(\cdot)\}$ 是生成的，而 $\{Y_{PW}(\cdot)\}$ 的每一项都是给定气温下负荷的纯气候敏感分量的均值。



a)



b)

图 4-19　第 10、11、12 及 13 周的 {Y_R(·)} 和 {Y_N(·)} 曲线[16]

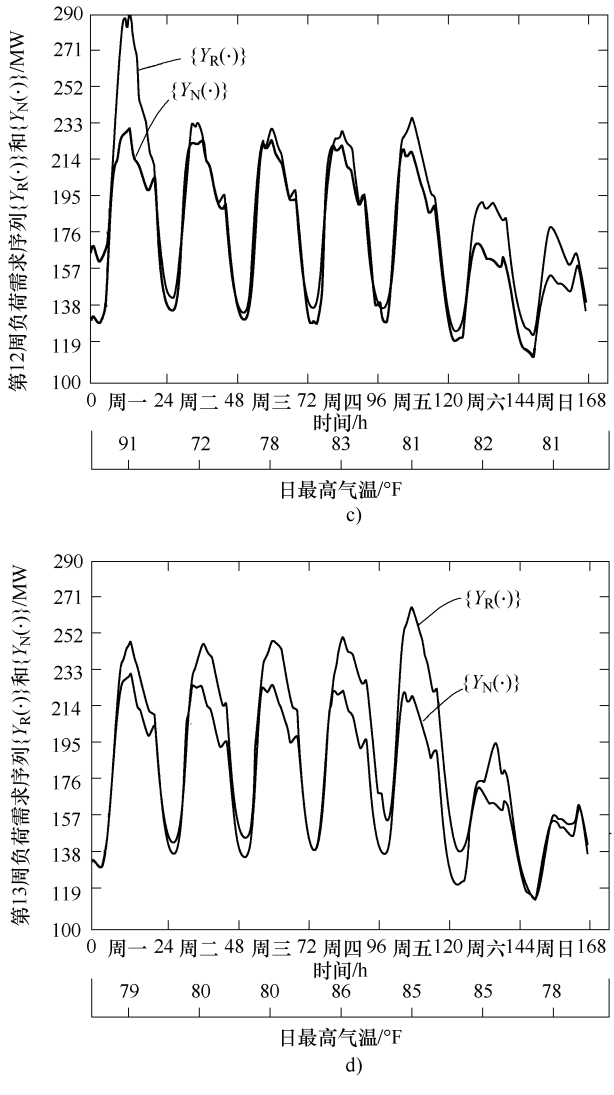


图 4-19 第 10、11、12 及 13 周的 {$Y_R(\cdot)$} 和 {$Y_N(\cdot)$} 曲线[16]（续）

图 4-20 表示在不同气温条件下负荷的纯气候影响分量的均值及标准偏差（$\pm 2\sigma_{PW}$）。

图 4-20 还描述了负荷的纯气候敏感分量。在 80～82°F、84～87°F 及 93°F 以上时气候敏感负荷序列已经饱和。

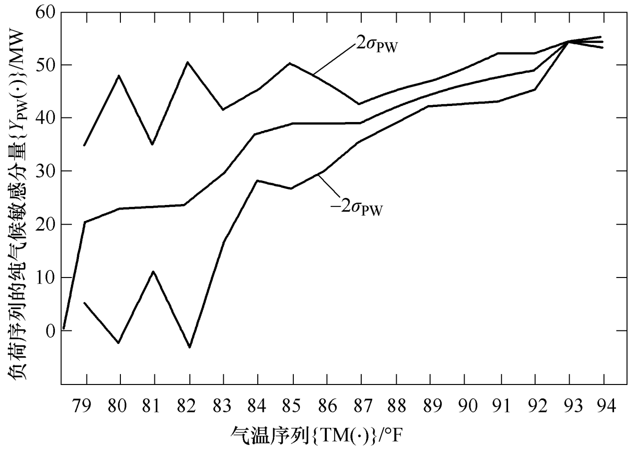


图 4-20　纯气候敏感负荷相对于温度的均值及标准偏差[7]

历史上，电网公司作为公共服务机构运营电力系统，以固定电价提供可靠电力而不考虑条件变化。电力系统使用附加的旋转备用机组为非预期负荷及由于设备故障断电提供服务。然而，在全球气候变化时代，就不可能再提供这类服务而不付出环境严重恶化的代价了[5]。

电网运行人员必须基于能源成本调度电源。然而，在规划负荷-发电平衡时气候敏感负荷分量增加了重大的不确定性。正如可预期的，安排成本最低的机组满足基荷，成本较高的机组满足时变负荷，因此随着负荷需求变化，电价是连续变化的。如果实施实时定价，为在高需求情况下优先保证可靠供电，就必须使用变化电价。

4.9　负荷系数

负荷系数是确定电价的重要因素之一。负荷系数是客户的平均电力需求与高峰电力需求的比值。正像已经观察到的，日负荷需求有每日变化，高峰电力需求的成本实际上比平均电力需求的成本高很多，因此电力需求的成本随着每天时间在变化。术语“实时定价”指的是分钟级电价的变化，它随着电能控制中心对已计划的发电机优化组合发电而变化。下式定义的负荷系数确定了电网中的电价：

$$\text{负荷系数}(\%) = \frac{\text{平均功率}}{\text{高峰负荷功率}} \times 100\% \tag{4-11}$$

平均功率定义为一个时间周期内的功率消耗值；而高峰负荷功率定义为在相同周期内最大功率消耗值。负荷系数可以以每日、每月和每年为周期计算。对于系统规划，负荷系数以每月或每年为基础计算。设备投资必须使系统能够应对最大需求，因此人们希望最大需求较低；另一方面，因为产生的收益与平均需求成正比，所以又希望得到的平均需求较高。因此理想的负荷系数是接近 1，它使得高峰负荷需求与平均需求互相接近。

要理解“功率因数”与“负荷系数”之间的差别。众所周知，功率因数决定了负荷有功和无功功耗，在电网中广泛使用的感应电动机的功率因数是滞后的；负荷系数是在一个周期内的平均功耗除以最严重情况下的功耗，因此负荷系数决定了在那个周期内供电单位输送单位电能的成本。换句话说，负荷系数说明了电网的运行效率。

例 4.1 某工业场所一年电力需求为恒定值 100kW（见图 4-21），计算给该场所提供一年电量用户的负荷系数。

解

$$电量 = 8760h/年 \times 100kW = 876000kWh/年$$

因为电力需求是常数，所以平均负荷和高峰负荷相同，该客户的负荷系数是 100%。

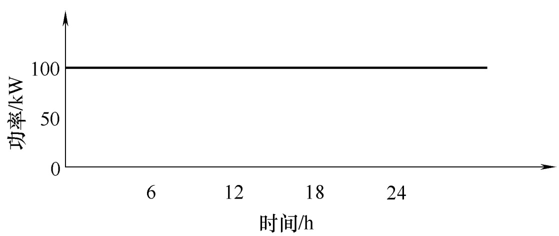


图 4-21 例 4.1 的 24h 负荷

例 4.2 某商业场所一天 12h 的高峰负荷需求为 200kW，其余时间平均负荷需求为 50kW（见图 4-22）。计算给该场所提供一年电量的客户负荷系数，并解释对工业场所（例 4.1）和商业场所提供电量的相关成本。

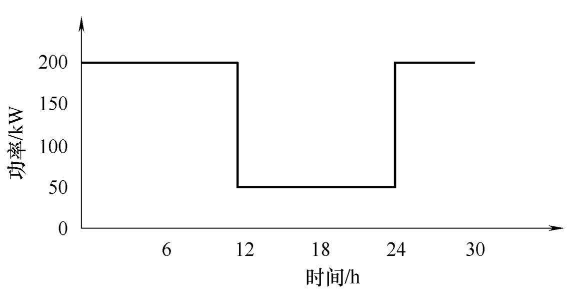


图 4-22 例 4.2 的 24h 负荷

解

$$平均功率 = \frac{\sum 功率_i \times 时间_i}{\sum 时间_i} = \frac{200 \times 12 + 50 \times 12}{12 + 12}\text{kW} = 125\text{kW}$$

$$负荷系数 = \frac{平均电力}{高峰负荷电力} = \frac{125}{200} \times 100\% = 62.5\%$$

当负荷系数接近 1（100%）时，发电厂是高效的。负荷系数越低，给负荷供电的成本越高。

低负荷系数的商业场所，如负荷系数在 50% 左右，电网为该场所供电就需要安装 2 倍于工业场所的设备和资源。低负荷系数意味着必须调整电价以弥补额外成本。因为商业场所和工业场所使用的电量相同，所以两个场所支付的电价相同。然而智能电表与实时定价相结合可以对提高效率及负荷需求控制提供激励，鼓励作为股东的用户在高峰电力需求期间控制负荷，将使用时间移到电价有利的时段。而且终端用户对参与安装当地风能和光伏等绿色能源也会有很高积极性。

4.9.1 负荷系数与实时定价

实时定价是 F. Schweppes[8] 在 1978 年 7 月能源危机期间提出的。对供电部门输送单位电量成本的简单分析解释了成本和发电站利用率之间的关系。实时电价由负荷系数、负荷需求及非预期事件决定。第一项成本是发电站利用加上它的运行成本。建一个大型发电站需要解决许多问题。在受监管的市场，建设一个大型发电站要花若干年时间，且远离负荷中心，电力要用长距离输电线路输送。燃煤电站通常建在煤矿附近。从运行角度看，大型电站突然跳闸会引起电力市场中实时电价的即时变化，因为由于成本原因，分配的实时备用是有限的。小电站通常是燃气电站，它们建设周期短，且建设成本可以比较准确地估计。燃气电站可以靠近负荷中心，因为这些电站占地有限。而且如果电站靠近负荷中心、电力不需要用长距离输电线路输送，电站的系统损耗较低。这些电站通常系统安全性更好、可靠性更高，当这些电站突然运行中断时，几乎不会产生有害后果。联合循环机组由于其高效是非常令人满意的。热电联产设施有吸引力的原因是它的额定值通常较低。可再生能源发电站有吸引力的原因也是它的运行成本低。因为电源种类繁多并且与之相关的成本不同，所以实时电力的成本是变化的，并需要随供给系统负荷的电源的变化来确定。

例 4.3 假设建设一个 1000kW 容量的光伏电站，造价为 500 美元/kW，终端用户以全部容量运行一年，如果投资的全部成本要在 2 年内收回，2 年内光伏电站平均一天运行 6h，且发电成本忽略不计，计算每千瓦时电量的成本。

解

$$\begin{aligned} 1\ 年消费电量 &= 容量 \times 时间 \\ &= 1000 \times 365 \times 6\text{kWh} = 2190\text{MWh} \end{aligned}$$

设 1kWh 电量的价格 = x（美元/kWh）

投资成本 = 容量 × 单位容量成本 = 1000 × 500 美元 = 500000 美元

因此，2 年消费的电量为 2190 × 2MWh = 4380MWh

$$4380 \times 10^3 \times x = 500000$$

$$x = \frac{500000}{4380 \times 10^3} = 0.1142\ (\text{美元/kWh})$$ ㊀

在负荷系数计算中引入燃料、劳动力及维修费用。

$$EUC = VC + \frac{\text{已摊销的固定成本}}{LF} \tag{4-12}$$

式（4-12）中，VC 项是与燃料和电站运行其他成本有关的可变成本，EUC 表示用美分/kWh 表示的单位电量成本。

例 4.4　假设建设容量为 1000kW 的天然气电站，造价为 300 美元/kW，假设可变成本 VC 为 2 美分/kWh。进行以下计算：

1）若以安装容量的 100% 一天 24h 供电 5 年，计算终端用户的电量成本。

2）若一天内以安装容量的 100% 供电 12h，一天的其余时间以安装容量的 50% 供电，连续供电 5 年，计算终端用户的电量成本。

3）画出单位电量成本与负荷的系数图，负荷系数（LF）为 0 ~ 1。

解

$$\begin{aligned}\text{投资成本} &= \text{容量} \times \text{单位容量造价} \\ &= 1000 \times 300\ \text{美元} = 300000\ \text{美元}\end{aligned}$$

全部容量 5 年时间提供的电量 = 1000 × 24 × 365 × 5kWh = 43800MWh

如果把投资费用分摊到 5 年，摊销的固定成本

$$= \frac{300000}{43800 \times 10^3}\text{美元/kWh} = 0.007\ \text{美元/kWh}$$

1）负荷系数 = 1

$$EUC = VC + \frac{\text{已摊销固定成本}}{LF}$$

$$EUC = 0.02\ \text{美元/kWh} + \frac{0.007}{1}\text{美元/kWh} = 0.027\ \text{美元/kWh}$$

2）

$$\begin{aligned}\text{平均功率} &= \frac{\sum \text{功率}_i \times \text{时间}_i}{\sum \text{时间}_i} \\ &= \frac{1000 \times 1 \times 12 + 1000 \times 0.5 \times 12}{12 + 12}\text{kW} = 750\text{kW}\end{aligned}$$

$$\text{负荷系数} = \frac{\text{平均功率}}{\text{高峰负荷功率}} = \frac{750}{1000} \times 100\% = 75\%$$

㊀ 译者注：原文误写为 $ 0.1142 kWh。

$$EUC = 0.02 \text{ 美元/kWh} + \frac{0.007}{0.75}\text{美元/kWh} = 0.029 \text{ 美元/kWh}$$

3）为了计算相对于负荷系数 *LF* 从 0 到 1 的单位电量成本，开发了一个 MATLAB 的 M 文件如下：

```
% PLOT OF EUC
clc; clear all;
LF = 0.01:.01:1;              % defining the range of
                              load factor
VC = 0.02;                    % variable cost
A_FC = 0.007;                 % amortized fixed cost
EUC = VC + A_FC./LF;          % defining EUC in $/kWh
EUC = EUC*100;                % converting into
                              cents/kWh
plot(LF,EUC)
grid on;                      % labeling the axes
xlabel('Load Factor');
ylabel('EUC(in cent/kWh)');
title('EUC vs Load Factor');
```

Plot:

从例题的解及图 4-23 中可以看出，*EUC* 随负荷系数降低迅速增加，这是因为当负荷系数较小时，电站容量未被充分利用。实时定价考虑了电网负荷系数及旋转备用成本，旋转备用是在线运行的，如果系统遭受意外事故，能保持系统运行在稳定运行状态。

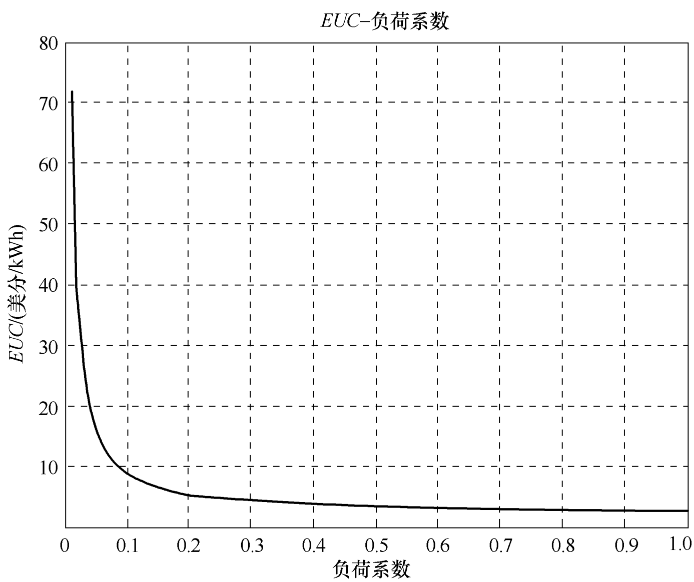


图 4-23　成本（美分/kWh）与负荷系数的关系

4.10　计算机控制的智能电网

计算机网络控制的智能电网包含许多微电网形式的分布式发电站。微电网在设备的设计、运行和通信方面结合了智能负荷控制设备[13-14]，这就使得电力终端用户和为其服务的微电网能更好地控制能源使用。如果电力终端用户选择节电方式，就可以关掉冰箱、洗衣机、洗碗机及微波炉这些智能电器。把智能建筑物中的这些智能电器与能量管理系统相连接就可以做到这一点。这项技术将使电力终端用户能控制他们的用电成本。与智能电表及智能电器结合的高级通信能力使拥有这些工具的电力终端用户能利用实时电价及以激励为基础的负荷控制。而且紧急减负荷能够基于轮换方式进行，通过关掉上百万空调的办法在几分钟内完成。随着实时定价，电力终端用户会有很高的积极性安装绿色发电设施，成为电能生产者。一旦实时电价确立，预计商业及工业单位自己会发电，并把过剩电力回卖给电网。

计算机网络控制的智能电网技术有 3 个要素：传感和测量工具、智能变送器及集成通信系统[13-14]。这些要素使用相位测量技术[15-16]及状态估计[17]，通过测量线路潮流、母线电压的幅值和相角，监视电力系统状态。采用的技术基于高级数字技术，如微控制器/数字信号处理器。数字技术推动了广域监视系统、实时线路评估及与实时热评估系统结合的温度监视等技术的发展。

变送器是传感器和执行器，在智能电网系统的计算机自动控制的数据采集和监视中起核心作用。智能变送器是结合了数字传感器、处理单元和通信接口的器件。智能变送器/控制器接受标准化的命令并发出控制信号。智能变送器/控制器也能基于变送器接口的反馈信息实现就地控制操作。在智能电网监测及控制的嵌入式控制系统中，低成本智能变送器的利用正在迅速增加。

实时双向通信正在智能电网系统中提供可行的新范例，它使终端用户可以安装绿色能源，并通过净计量将电量反卖给电网，客户可以签署不同级别的服务。供应商提供的实时电价智能电表推动了客户之间的通信，客户可以通过互联网账户跟踪电量的使用。为达到预期目的，期望电价可以在互联网上一天前发布，把实时电价提供给终端用户并使他们知道，当能源系统供应紧张时，减少他们的用电量可以省钱[16-17]。

智能电表允许系统运行人员控制系统负荷。负荷控制最终会为形式为可再生绿色能源的当地发电提供新的市场。随着智能电表（即净计量系统）的安装，终端用户能用可再生能源自己发电，并把多余的电力卖给当地电网。

随着更多客户使用净计量系统，能源需求会发生实质性改变。居民、商业和工业企业将作为独立电力生产者安装光伏系统，使用风电场、微型发电技术及储能[18]。自备可再生能源发电和 CHP 的智能建筑物的能量管理系统可能是未来的趋势。随着高级净计量系统的安装，系统的每个节点都将能买卖电力。在智能电网系

统中，使用实时电价会使控制频率和联络线偏差更容易。当电网运行于事故情况时，实时定价将提供反馈信号作为低频减载经济决策的基础，以支持对智能电网的直接稳定控制。为使系统负荷需求与发电实时匹配，可以把实时定价与需求响应整合成一体。这将推动协调需求以平滑用电的突然变化。如果需求侧的突然冲击变化没有被满足，将会导致电网级联崩溃。在需求侧响应控制中，不增加旋转备用发电的成本也能消除这些尖峰波动，还可以减少维护并延长设备寿命。通过使用智能电表编制程序，并仅在电价最便宜时运行低优先级家庭电器，电力用户可以缩减电费账单。

图 4-24 表示截止 2009 年 4 月美国智能电表的安装情况。

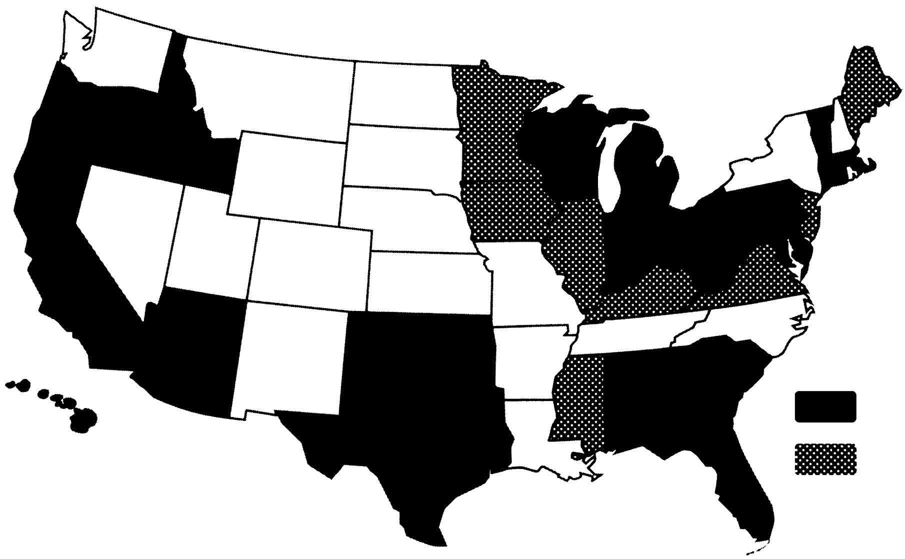


图 4-24　由投资者所有的电力公司和某些公共电力公司的智能电表配置、计划配置，以及已提出的配置

http：//www. edisonfoundation. net/IEEE；截止至本书稿完成，大约 6 千万用户已经安装了智能电表[1]。图中灰色区域表示智能电表配置大于终端用户的 50%，点白相间区域表示智能电表配置小于终端用户的 50%。

图 4-17 画出了 MRG 系统。MRG 系统的能量管理系统（EMS）与位于居民、商业及工业客户场所的个体智能电表通信。智能电表使用以太网 TCP/IP 传感器、变送器及通信协议，控制如空调系统、电炉、电采暖器、电加热器、冰箱、洗衣机及烘干机等负荷，如图 4-25 所示。

MRG 系统的 EMS 智能结从当地智能电表接收所连接负荷的状态信息。MRG 系统的 EMS 根据实时定价信号及正常、报警或事故电网信号控制各种客户负荷。通常 EMS 从电网及开放式接入即时信息系统（Open Access Same-time Information System，OASIS）[1-6]获得信息。基于实时定价编制智能电表程序以控制客户场所的负

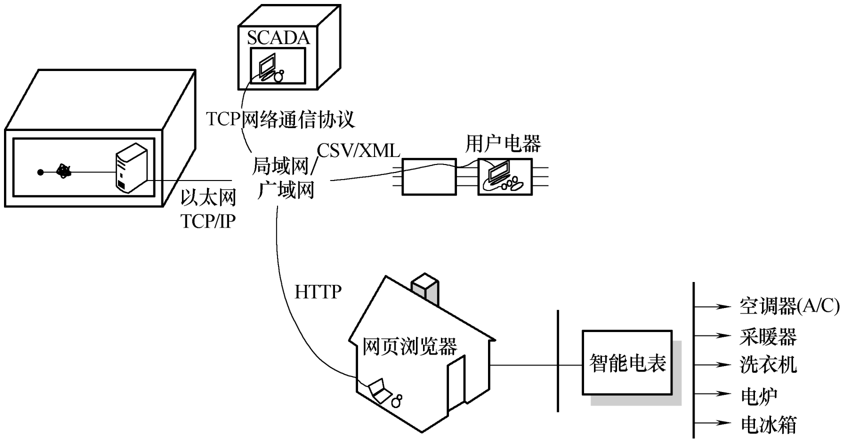


图 4-25　适于负荷控制的以太网 TCP/IP 传感器、变送器及通信协议

荷，负荷的 EMS 控制与来自 EMS 及客户预建立的合同标准的输入信号有关。MRG 微电网的 EMS 有能力降低客户的负荷并且响应当地电网的运行条件。

智能微电网系统由各种可再生绿色能源发电及与其有关联的功率变换器、高效率变压器和储能系统组成[18]。

4.11　智能电网的发展

煤炭发电对全球变暖和环境压力的影响正在改变电网的运行和设计。电力工业正在经历对发电、输电和配电的基础设施的发展产生长远影响的逐步变革。最基本的改变是基于分布式监视、自动化和控制以及新传感器的等级的提高，在新的分布式发电规划中包含可再生绿色能源。电网控制将依赖从每个非集中控制的微电网收集的数据和信息，反之微电网和互联电网将能够作为更可靠、有效及安全的供电方运行。

电网及微电网技术有许多要素。适应、自治的非集中控制对变化条件做出响应。预测算法捕捉广域电网状态（相位测量）[16]并能辨识潜在停电。系统也能提供实时定价及在客户、电力网络和电力市场之间互动的市场结构，因此，智能电网提供了一个使可靠性、可用性、有效性及经济性最大化的平台，对防御袭击以及自然发生的供电中断具有更高的安全性。当前电网与智能电网的比较见表 4-2。

表 4-2　当前电网与智能电网的比较

	目前电网	智能电网
系统通信	局限于电力公司	范围扩大，实时的
与电力用户的交互	局限于大电力用户	高密度双向通信

（续）

	目前电网	智能电网
运行及维护	手动及调度	分布式监控、诊断，可预测
发电	集中的	集中与分布的、可持续的可再生资源及储能
潮流控制	有限	更广泛
可靠性	基于稳态、离线模型及仿真	前瞻的、实时预测，更实际的系统数据
恢复	手动	非集中控制
拓扑	主要为辐射状	网络状

高级计量基础设施的实现可以为电力终端用户提供实时定价。同时可再生能源的渗透正在为已连接到当地电网的微电网的自治控制或本地控制提供平台，分布式自治控制将通过故障诊断、隔离及恢复来保证可靠性。自治控制和实时定价还使供电电压损失最小化，实现了高效率，并减小了即插即用电动汽车的高峰负荷供电需求。成熟的储能技术将给社区提供能量存储，这也成为微电网控制的另一个要素，为电力用户成为电能生产者提供可能性。为了从智能电网获得收益，这些交互技术要求对系统进行协同建模、仿真及分析。

4.12 智能微电网可再生绿色能源系统

图 4-26 及图 4-27 是 MRG 系统的直流及交流结构示意图。MRG 系统也包含计算机网络通信系统，它由用于监视、控制和追踪系统的正常、报警、事故及恢复状态的智能传感器组成。

MRG 系统的智能电表连接到大型互联电网中（见图 4-17）。MRG 系统也被设计成能提供智能电网优化的管理者，它允许基于定价信号及网络强度控制各类客户负荷。智能电表通过改变电力使用控制客户方的装置。当电价在规定水平之上时，智能电表能降低客户负荷并允许分布式发电并网，EMS 可在它控制之下与智能电表进行双向通信，微电网 EMS 接收来自所有模块（负荷及电源）的状态和电力信号，EMS 也能基于天气预报、负荷预测、机组可用性及电力销售交易等变量，控制微电网进、出它的宿主当地电网的潮流。

MRG 系统提供了定义分布式发电（Distributed Generation，DG）运行的新范例。MRG 系统被设计成作为单一可控系统运行的一群负荷和微电源。对于当地电网，这个群成为能在秒级响应的单一可调度负荷。智能微电网的互联点用一个节点表示，微电网在这个节点连接到当地电网，如图 4-26 及图 4-27 所示。这个节点也称为当地边际定价点（Local Marginal Pricing，LMP）[5-6]，此节点的价格（成本）代表当地电量的价值。电网（供电实体）努力为电力用户可靠供电。最大效益要求低成本、充分供应及稳定运行。图 4-26 及图 4-27 示出了智能电网技术关注的两

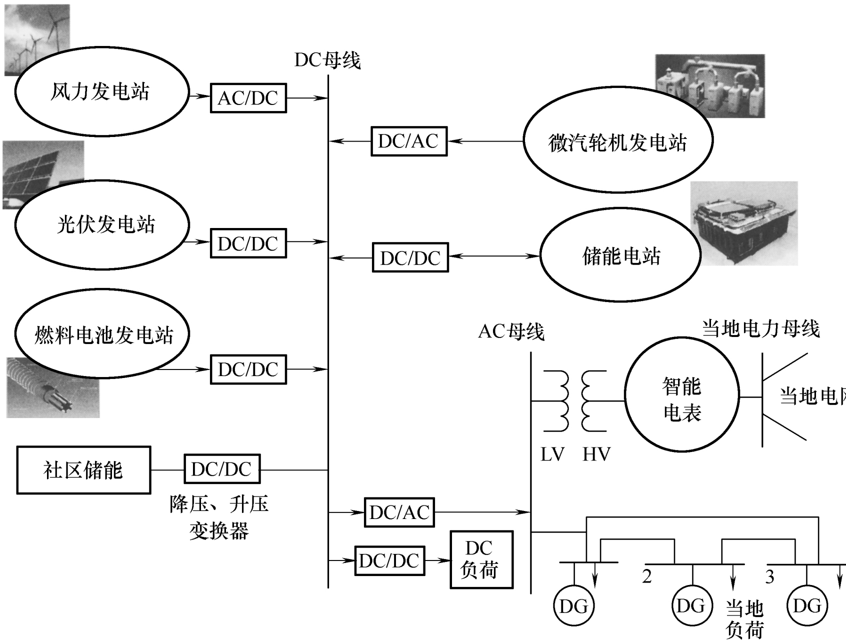


图 4-26　微电网可再生绿色能源（MRG）分布式发电（DG）系统的直流结构

种结构，因为它们具有便于即插即用的能力。在上述结构中，绿色能源，如燃料电池、微汽轮机或光伏电站、风电场等可再生能源，使用统一的可互换变换器，可连接到直流母线或交流母线。

MRG 系统必须能以两种模式运行：①与当地电力系统同步运行；②一旦失去电力系统，以孤岛方式运行。在孤岛方式运行中，MRG 系统作为自治微电网运行，控制微电网频率及母线电压；当 MRG 系统连接到电网时，MRG 系统使用主、从控制技术运行，这里“主”指的是当地电网的 EMS，“从”指的是 MRG 微电网。如果 MRG 系统突然从当地电网分离，MRG 会保持稳定，并从控制器接管 LFC 及电压控制。对于大容量 MRG 系统，电网与 MRG 系统之间的购电协议考虑了有功及无功功率的交换。MRG 系统能够控制它的负荷，并从当地电网接受“价格信号”和/或“事故运行信号”，调整它的有功及无功出力。MRG 系统有适当的降负荷硬件以响应价格信号，它能使次要负荷轮流交替运行以使重要负荷不脱网。然而，因为在当前技术条件下当地电网的扰动不能预测，一旦当地电网失电，MRG 系统若不能迅速从当地电网断开，就很有可能维持不住稳定。为提供预测模型追踪系统状态并提供分布式智能控制技术，对 MRG 系统计算机网络监视及控制的进一步研究正在进行中。

图 4-26 及图 4-27 中，EMS 控制无穷大母线电压及系统频率。从控制器控制逆变器交流母线电压和逆变器电流，因此 MRG 系统逆变器的从控制器必须能够运行

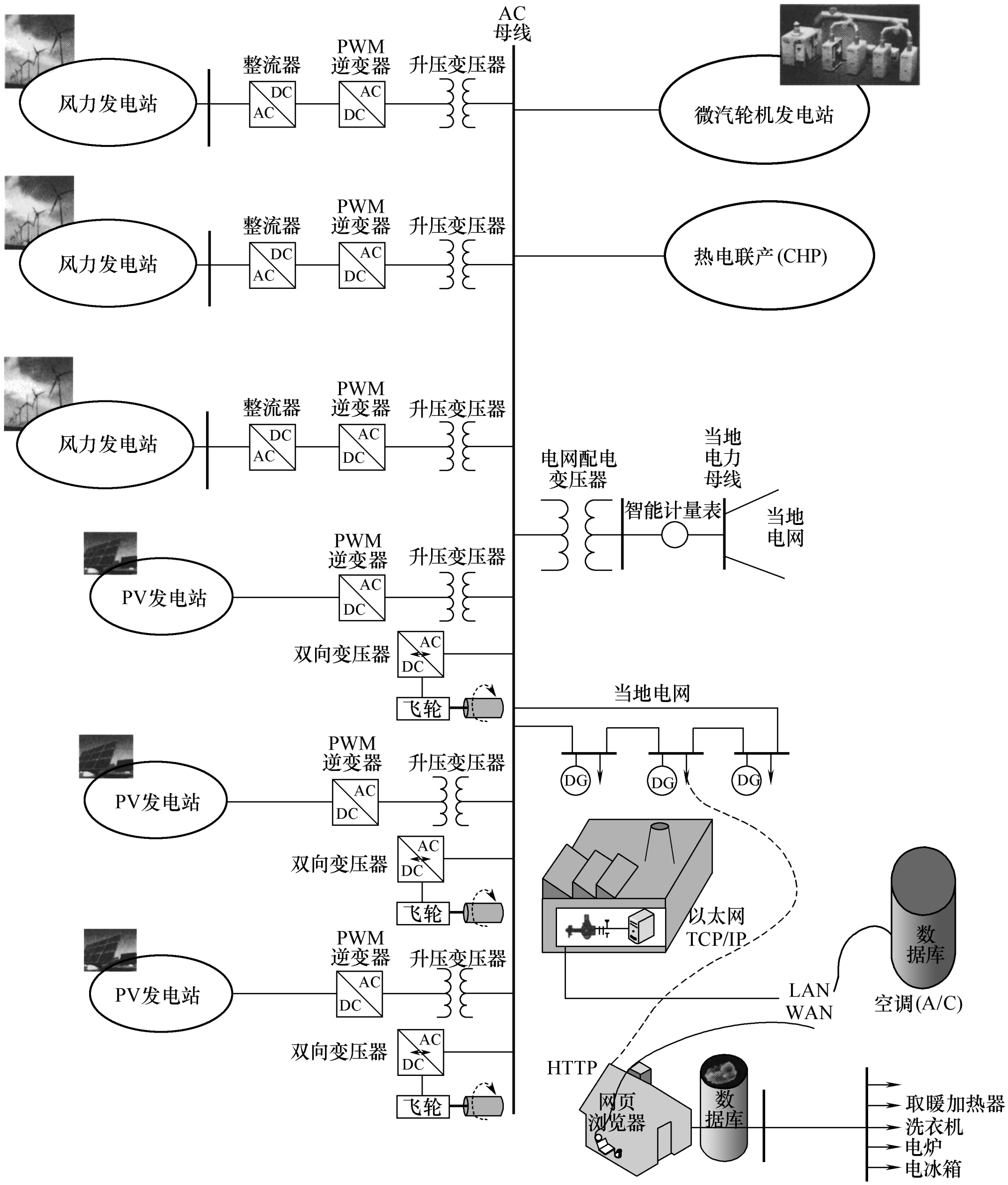


图 4-27　微电网可再生绿色能源（MRG）分布式发电系统（DG）的交流结构

在超前、滞后功率因数，或在功率因数为 1 时，控制有功及无功功率。在小型可再生能源系统中，逆变器功率因数被控制为 1，它把电压控制，即无功功率控制留给当地电网的 EMS。

图 4-26 及图 4-27 中的 MRG 系统有许多风力发电站、光伏电站等分布式电源，这样一个系统的容量在 1～10MW。用升压变压器把交流电压升高以减少电量损失，

在把功率注入当地电网之前，把电压升到 34.5～69kV，所选电压等级与分布式发电（DG）的容量有关。如图 4-28 所示，储能系统可以存储可再生能源，在每天 24h 负荷循环中，存储的电能可用于应对负荷需求波动。因为电网开发投资相当高并且电网建设需要很多年，因此电力系统是提前若干年规划的。然而如果把可再生绿色能源安装在分布式系统中，其提前规划的时间是几个月到几年，与安装设施的容量有关。

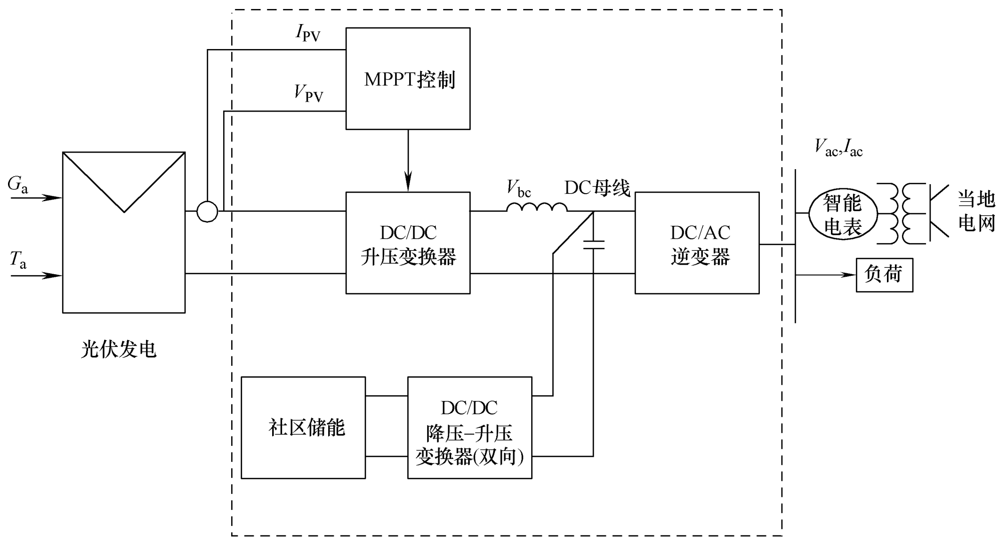


图 4-28　含当地储能系统的居民区微电网可再生绿色能源（MRG）系统

图 4-28 所示的住宅 MRG 系统由容量范围在 5～25kVA 的屋顶光伏组成，容量大小与屋顶可用面积有关。DC/DC 升压器用于提升直流母线电压，最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）系统设计为光伏发电跟踪，运行在最大功率点。DC/AC 逆变器把直流母线电压转换为满足运行频率及住宅区额定电压要求的交流电压。图 4-28 的 MRG 系统把电压升到当地配电网电压后与当地电网连接，MRG 系统也能在白天存储直流电力供夜间使用。

图 4-27 表示了电能注入到互联电力系统中所有电压等级的网络，这些注入节点是图 4-27 所示计算机网络控制的智能电网 MRG 系统的一部分。负荷在智能电表的控制之下。因此计算机网络控制的电网的每个节点都是对价格敏感的。

高渗透率可再生绿色能源可以在如图 4-29 所示的所有电压等级接入电网。美国许多州已经颁布了使用可再生能源的政策，要求到 2025 年之前投资者拥有的电力公司提供电力的 25% 需从可再生能源及高级能源获得。某些州规定，太阳能光伏发电应占全部电量的 0.5%。从 2009 年开始，对不符合太阳能发电标准的电量罚款 450 美元/MWh，对不符合其他标准的电量罚款 45 美元/MWh。这些标准可以通过购买可再生能源信用证（Renewable Energy Credit，REC）得到满足，每个

REC 等于 1MWh 可再生能源电量。产品购买者也可以把 REC 销售到 REC 市场。撰写本书时，当前的 REC 现值大约是 37.50 美元，预计太阳能 REC 的销售价格还会更高[1-5]。

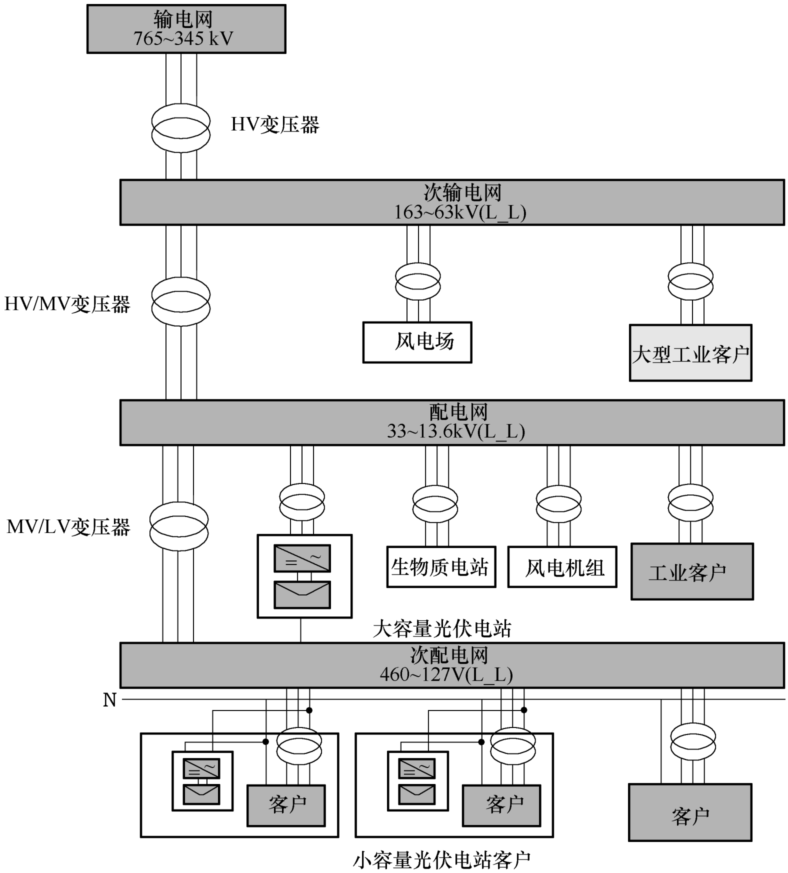


图 4-29　具有高渗透率可再生能源的智能电网

智能 MRG 系统有许多优点，它准许个体提供他/她自己的能源需求，这种电力终端用户的参与被称为“能源民主化”。它允许他们把负荷特性与自己的发电相匹配，从而使这类微电网不会受互联电网电力失效的影响。智能 MRG 技术有能力辨识潜在的稳定问题，实时信息使 MRG 系统能从互联电网中分离出来以“孤岛”方式运行。正常同步运行时，为了控制系统负荷并避免全系统范围的断电，具有智能监视功能的互联智能电网能控制和管理互联电网。

当智能微电网 DG 连接到电网时，智能微电网的 DG 电站应使用主从控制技术运行。“主”是电力系统的 EMS，EMS 控制微电网与当地电网的连接节点的无穷大母线电压。图 4-27 中，智能电网 DG 通过变压器连接到电力系统。从控制器控制微电网逆变器的交流母线电压（母线电压的幅值与相角）及逆变器电流，因此，

微电网 DG 逆变器的从控制器也控制有功和无功功率。微电网逆变器设计为运行在功率因数 1，把电压控制，即无功功率控制放到电力系统的 EMS 中完成。或者 DG 的逆变器以超前功率因数、滞后功率因数运行。如果智能电网突然从当地电网分离且须维持系统稳定性，那么从控制器就接管 LFC 及电压控制。

“智能”一词指的是下列要求：微电网控制它的负荷，从当地电网接受“价格信号”和/或“事故运行信号”，调整它的有功与无功出力。也可以使用其他设计，如在当地电网 EMS 与微电网 EMS 两者之间的净计量通信。智能微电网应有适当的硬件配置去降负荷、响应电价信号，或使次要负荷轮替、给重要负荷供电。然而因为电力系统的扰动不能预测，DG 微电网系统应设计为能迅速从大电网退出而保持微电网 DG 系统的稳定性。为保证稳定运行，带逆变器的微电网储能系统必须能参与辅助服务市场[5]。图 4-27 的结构关注分布式发电技术，因为它具有易于即插即用的能力。在此结构中，绿色能源如燃料电池、微汽轮机或光伏电站及风电场等可再生能源可以使用统一的、可互换的变换器接到直流母线。图 4-27 的结构满足许多州已经颁布的“可再生能源配置（Renewable Portfolio）”法案。此结构允许把电量卖给当地电力公司并从电力公司购买电量。注意，如果客户端的本地发电能控制负荷的话，微电网就能通过计算机网络控制的智能电表或净计量进行负荷控制，提供实时定价或基于合同的电价。智能电表及计算机网络控制也示于图 4-27。此外，在大型电力系统中，微电网能通过它自身的智能计量参加大功率层次的系统控制。这里的智能计量是微电网与当地电网 EMS 的接口。

微电网 DG 系统设计要求它一旦从当地电网独立出来，并且如果已经出现发电缺额，要以甩掉次要负荷的方式使当地微电网 DG 系统恢复到正常运行状态。稳定性是由与微电网 DG 系统连接的电网的坚挺程度决定的，当确定系统参数、确定微电网 DG 系统连接到当地电网的电压等级时，必须注意这个问题。它还要求微电网 DG 系统包含 CHP、微汽轮机等其他绿色能源，以确保在某些电源发生强制停电时能保证电能质量及稳定供电。

正如第 2 章所述，传统的互联电网是为单向功率流动设计的。然而，当次输电网、配电网及居民区的系统能够发出更多电力时，功率就可能反向流动，从低电压到较高电压，从而产生反向潮流，这就可能引发安全性及可靠性问题。智能电网的这些保护问题是当前研究的另一个重要课题。

电网设计需要大量投资。而智能电网可以通过电力的合理定价降低运行及维护成本。这种优化的发电及输电线路规划将产生高效潮流，将减小电力损耗并提高最低成本发电机的有效利用。目前，互联电网在发电厂、输电线路、变电站及主要负荷中心的控制系统内有许多通信系统，能量流从发电机指向负荷中心。电力系统运行人员通过计量潮流、测量母线电压和频率来监视系统。系统需求通过负荷频率控制及 AGC 满足。当系统需求不能得到满足时，会产生系统频率下降及电压不足、轮流停电或非受控停电。用户的电力需求总量由环境条件决定，变化范围很大。备

用发电厂的旋转备用保持在在线备用方式以响应电力需求波动。具有独立 MRG 系统的智能电网削减了旋转备用的成本，因为其运行系统是基于实时定价的。

4.13　电网汽轮发电机

前面已经介绍了智能电网和 MRG 系统微电网的基本系统概念。然而互联智能电网和 MRG 系统微电网两者还要用到以下几个基本分析概念：发电机建模、输电系统稳态功率输送限制，以及智能电网和潮流的建模。

图 4-30 所示的三相同步发电机为三端设备[19-20]。机械功率是输入量，它来自驱动发电机转轴的水电或热力单元的机械功率等一次能源。发电机励磁绕组位于其转子上。励磁绕组由发电机励磁系统通过集电环或把励磁安放在电机转子上由直流电流激励。三相平衡绕组位于电机定子上。正如其名称所表达的，定子是静止的，转子是电机的旋转部件，定子和转子之间的间隙称为电机气隙，气隙宽度为毫米级，转子由设计良好的轴承系统支撑，以保持气隙尽可能小，同时避免转子与定子接触（即摩擦）。因为气隙宽度设计得尽可能小，大量磁力线会跨过气隙链接到电机定子，励磁绕组旋转会在电机气隙里产生时变磁通。时变磁力线经过位于电机定子的三相绕组，产生两类时变磁通，第一类是跨过电机气隙的链接磁通，第二类是通过空气泄漏的漏磁通。漏磁通产生励磁电感和漏感。由于感应电压和电流是在定子绕组上产生的，因此定子绕组也称为电枢绕组。

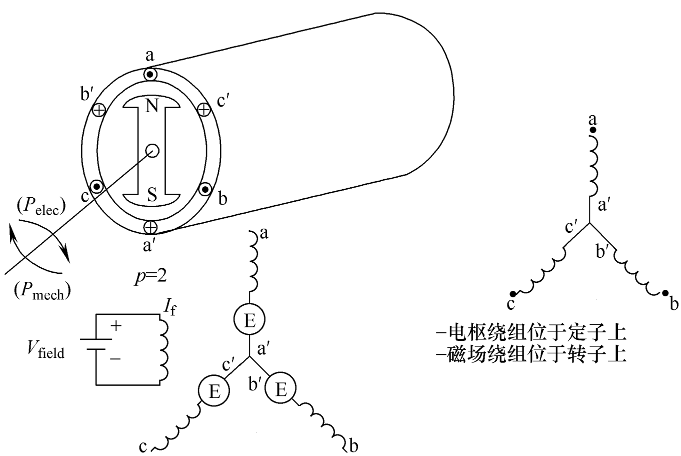


图 4-30　三相同步发电机

发电机的运行频率由轴转速决定，表示如下：

$$\frac{d\theta_{elec}}{dt}=\frac{p}{2}\frac{d\theta_{mech}}{dt} \tag{4-13}$$

$$\omega_{\text{elec}} = \frac{p}{2}\omega_{\text{mech}} \tag{4-14}$$

$$2\pi f_{\text{elec}} = \frac{p}{2}\omega_{\text{mech}} \tag{4-15}$$

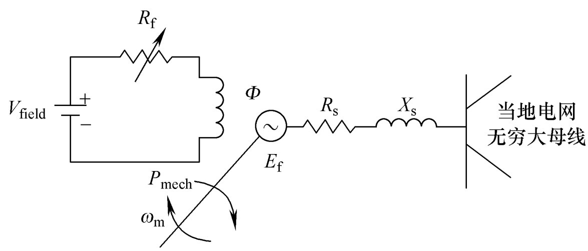
$$\omega_{\text{mech}} = n\,\frac{2\pi}{60} \tag{4-16}$$

$$f = \frac{p}{2}\,\frac{n}{2\pi}\,\frac{2\pi}{60} = \frac{pn_{\text{sys}}}{120} \tag{4-17}$$

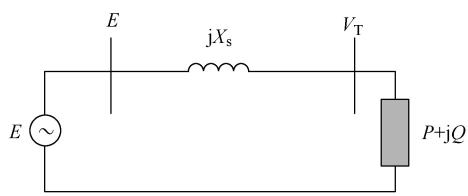
式中，$n_{\text{sys}} = 120f/p$，p 是极数，θ_{elec}及 θ_{mech}分别是用弧度表示的电气角度及机械角度，ω_{elec}及 ω_{mech}分别是用每秒弧度表示的电气转速及机械转速。最后，n 是每分转速（r/min），f 是每秒周波数，n_{sys}是用 r/min 表示的同步转速。

$$E = K \cdot I_{\text{f}} \cdot \omega \tag{4-18}$$

开路感应电压 E 是电机尺寸的函数，由常数 K、励磁电流 I_{f} 和轴转速 ω 决定。图 4-31a 表示连接到当地电网的一台发电机的单线图，图 4-31b 表示三相发电机的电路模型。图中感应电压用 E 表示、发电机端电压用 V_{T} 表示。电机的励磁电感没有在以上电路模型中表示出来。发电机设计为只需很小的励磁电流。由于计算条件为稳态同步运行，所以漏感用同步电抗 X_{s} 表示。发电机出力用有功功率 P 和无功功率 Q 表示。



a)



b)

图　4-31

a）联结到当地电网母线的单台发电机　b）三相发电机的单相等效电路模型

目前有许多种常用的励磁机。直流发电机换向器励磁机中，励磁能量由直流发电机供给。为将直流励磁电流注入发电机励磁绕组，励磁机包含一台带换向器及电刷的直流发电机，它是输入控制部件中独有的。励磁机也可由电动机、原动机或同

步电机轴驱动。发电机整流器励磁机的驱动能量来自发电机，并由整流系统转换为直流。这类励磁机包含发电机及无控制或受控的大功率整流器。发电机可以由电动机、原动机或同步电机轴驱动，整流器可以是静止的或随发电机轴旋转。复合整流器励磁机从同步电机端子获得驱动功率，然后由整流系统转换为直流[22]。

现在研究图 4-32 所示的与互联电力网并联的发电机的运行。

同步运行必须满足下列条件：

1）该同步发电机的电气转速应等于电力系统中发电机的电气转速。

2）发电机的机端电压应等于母线电压 V_∞，且相序必须相同。

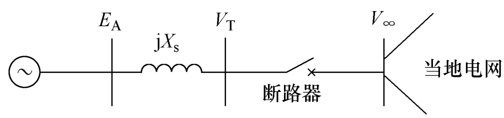


图 4-32　同步之前发电机的运行

当上述条件得到满足时，可闭合断路器。同步运行意味着同步发电机并联运行。符号 V_∞ 母线有特别含义，称母线为无穷大的意思是它的电压是常数，且不会随外部情况而改变，这意味着无穷大母线具有理想电压源的效果。

现在研究图 4-33a 所示的同步发电机与互联电力系统同步时的运行情况。因为电力系统内有许多电源，可以认为连接这台发电机的电力系统母线是“无穷大母线”。

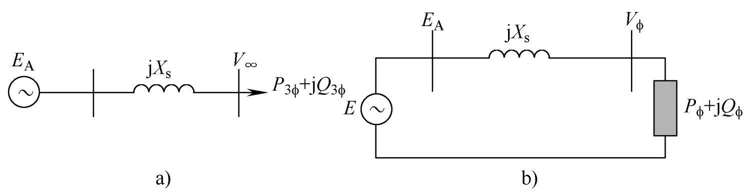


图 4-33　发电机与电力系统的并联运行

a）单线图　b）单相等效电路模型

假设忽略发电机运行中的电力损耗，且其基准相位由下式给出：

$$V_{\infty,\mathrm{L\text{-}N}} = V\angle 0°,\qquad (4\text{-}19)$$
$$E_{\mathrm{A,L\text{-}N}} = E_{\mathrm{A}}\angle\delta$$

可以用图 4-33b 的等效电路计算负荷电流。

$$I_{\mathrm{L}} = \frac{E\angle\delta - V}{\mathrm{j}X_{\mathrm{s}}} \text{及 } I_{\mathrm{L}}^{*} = \frac{E\angle\delta - V}{-\mathrm{j}X_{\mathrm{s}}}\qquad (4\text{-}20)$$

发出并供给负荷（每相），即注入电力系统的复功率可由下式计算：

$$S_\phi = \mathrm{j}\frac{E_{\mathrm{A}}^2\angle 0°}{X_{\mathrm{s}}} - \mathrm{j}\frac{E_{\mathrm{A}}V\cos\delta}{X_{\mathrm{s}}} + \frac{E_{\mathrm{A}}V\sin\delta}{X_{\mathrm{s}}} = P_\phi + \mathrm{j}Q_\phi\qquad (4\text{-}21)$$
$$P_\phi = \frac{E_{\mathrm{A}}V}{X_{\mathrm{s}}}\sin\delta \text{ 且 } Q_\phi = \frac{E_{\mathrm{A}}^2}{X_{\mathrm{s}}} - \frac{E_{\mathrm{A}}V}{X_{\mathrm{s}}}\cos\delta$$

因为已假设忽略损耗，所以供给发电机轴的机械功率可以表示为

$$P_{mech}=3P_{\phi}=3\frac{E_{A(L-N)}V_{\infty(L-N)}}{X_s}\sin\delta=\frac{E_{A(L-L)}V_{\infty(L-L)}}{X_s}\sin\delta \tag{4-22}$$

为了理解发电机如何能以超前或滞后功率因数运行，需要研究相角 δ 和励磁电压 E_A 之间的关系。

考虑图 4-34 所示的同步发电机：

假设供给发电机轴的机械功率为常数且忽略损耗，则供给的机械功率 P_{mech} 等于注入当地电网的电功率，如式（4-22）所示。

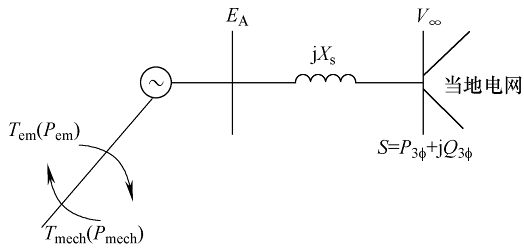


图 4-34　功率注入当地电网的发电机运行

如果将励磁电流调整到 $I_f=I_{f0}$，则励磁电压将满足等式 $E_A=E_A\angle\delta_0$，这里下标“0”表示上述条件。

当 $E_A=E_A\angle\delta_0$，$I_f=I_{f0}$时，这些条件可以表示为 $P_{elec}=3\frac{E_AV_\infty}{X}\sin\delta$

且

$$P_{elec}=3\frac{E_AV_\infty}{X_s}\sin\delta=P_{mech} \tag{4-23}$$

图 4-35 表示功角与励磁电压 E_A 的关系。如果将 I_f 减小到新值 I_f'，则 E_A 降低到新值 E_A'。若继续保持 P_{mech} 为常数，并继续减小 I_f，就仍然能发出同样数量的电功率；因此，如果 E_A 减小到新值 E_A''，为发出同样数量的电功率，角 δ 需要持续增加，直至达到 90°。

$$P_{elec}=3\frac{E_A''V_\infty}{X_s}\sin 90°=P_{mech} \tag{4-24}$$

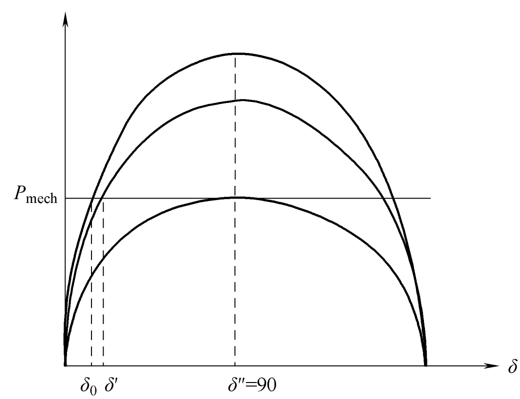


图 4-35　不同 E_A 值下，P_{mech} 与功角之间的关系曲线

这是最大发电功率，称为失步功率。如果进一步减小 I_f，P_{mech} 就会减小且 δ 增加。$\delta>90°$时电机失去同步，即功率不能注入电网，当地电力系统将驱动此台电机作为电动机运行，角 δ 称为功角或转矩角[22]。

考虑一台发电机以滞后功率因数给当地电网供电。如以前讨论过的，AGC 将保证维持发电与负荷之间的平衡，此情形如图 4-36 所示。

$$\sum_{i=1}^{6} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{6} P_{Li} + P_{losses} \tag{4-25}$$

$$\sum_{i=1}^{6} Q_{Gi} = \sum_{i=1}^{6} Q_{Li} + Q_{losses} \tag{4-26}$$

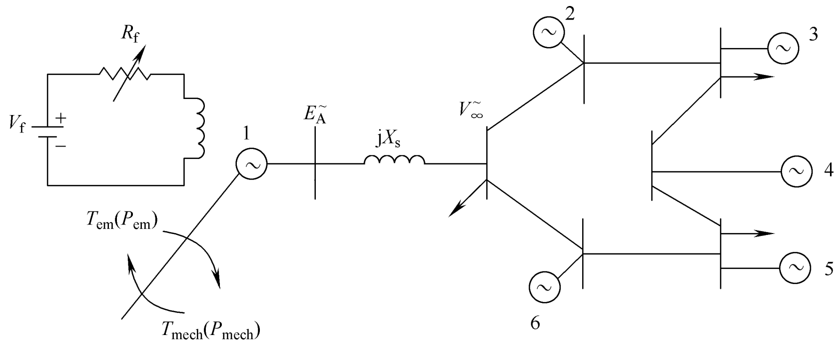


图 4-36 以滞后功率因数注入功率到当地电网的发电机运行

考虑图 4-37 的等效电路模型，假设忽略功率损耗并假设 $V_{\infty(L\text{-}N)} = V\angle 0°$，$E_{A(L\text{-}N)} = E_A \angle \delta$，及以下运行条件：$P_{mech}$ = 常数，$|E_A|$ = 常数（即 ω_m = 常数，I_f = 常数）。调整磁场电流 I_f，使 $|E_A| > V_\infty$。

$$\tilde{E}_A = jX_s L_L + \tilde{V}_\infty$$

$$P_{mech} = 3\frac{E_{A(L\text{-}N)} V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta = \frac{E_{A(L\text{-}L)} V_{\infty(L\text{-}L)}}{X_s}\sin\delta$$

$$P_{mech} = P_{3\phi} = 3\frac{E_{A(L\text{-}N)} V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta = 3V_{\infty(L\text{-}N)} I_L\cos\theta \tag{4-27}$$

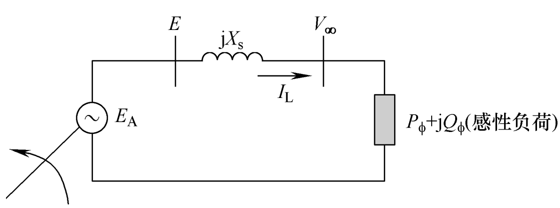


图 4-37 以滞后功率因数注入功率到当地电网的发电机等效电路模型

图 4-38 表示发电机以滞后功率因数运行。当励磁电压幅值大于端电压幅值（即 $|E_A| > V_\infty$）时，运行条件称为过励磁发电机。

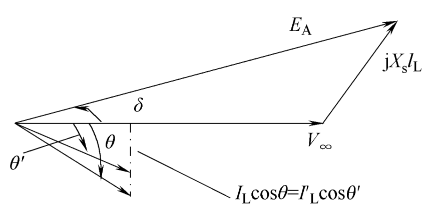


图 4-38 以滞后功率因数注入功率到当地电网的发电机相量图

为改变发电机的功率因数，保持输入机械功率为常数：P_{mech} = 常数，且轴转速也为常数，即 ω_m = 常数。

把励磁电流 I_f 值减小到新值 I'_f，励磁电压 E_A 就降低到新值 E'_A。然而因为输入机械功率不变，发电机发出的电功率也必须保持不变。因此角 δ 增加到更大值，这个情况可表示为

$$P_{mech}=3P_{\phi}=3\frac{E_{A(L\text{-}N)}V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta=3\frac{E'_{A(L\text{-}N)}V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta' \quad (4\text{-}28)$$

$$P_{mech}=P_{3\phi}=3\cdot V_{\infty(L\text{-}N)}I_L\cos\theta=3\cdot V_{\infty(L\text{-}N)}I'_L\sin\theta' \quad (4\text{-}29)$$

可见，功率维持了平衡，$|I_L|$减小到了新的较低值$|I'_L|$，且 θ 降低到新值 θ'。

然而，因为 $I_L\cos\theta=I'_L\cos\theta'$，所以发出的有功功率仍然不变。

$$Q_{3\phi}=3\cdot V_{\infty(L\text{-}N)}I_L\sin\theta \qquad Q'_{3\phi}=3\cdot V_{\infty(L\text{-}N)}I'_L\sin\theta' \quad (4\text{-}30)$$

可以得出结论是，通过减小 I_f，降低了同步发电机发出的无功功率，然而同步发电机发出的有功功率仍不变，并且得到了新的运行条件，即 $Q_{3\phi}<Q'_{3\phi}$，同时维持了发电与负荷的平衡。

$$\sum_{i=1}^{6}P_{Gi}=\sum_{i=1}^{6}P_{Li}+P_{losses} \quad (4\text{-}31)$$

$$\sum_{i=1}^{6}Q_{Gi}=\sum_{i=1}^{6}Q_{Li}+Q_{losses} \quad (4\text{-}32)$$

假设决定同步发电机运行在单位功率因数下，为得到单位功率因数，可以减小励磁电流 I_f，使功率因数角 θ（即 V 与 I 之间的夹角）减小到零。

$$P_{mech}=P_{3\phi}=3\frac{E''_{A(L\text{-}N)}V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta''=3V_{\infty(L\text{-}N)}I''_L\cos\theta'' \quad (4\text{-}33)$$

式中，$\theta''=0$。

图 4-39 表示发电机以单位功率因数运行。可以得出结论，减小 I_f 可以使电机运行在单位功率因数，同时发出相同的有功功率，而电机发出的无功功率减小到零。

假设继续减小励磁电流 I_f，使 $\theta>0$，即 I_L 领先于 V_∞，此时的运行情况如图 4-40所示。

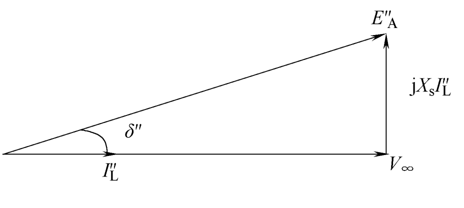


图 4-39　仅有功功率（即功率因数为 1）注入当地电网的发电机相量图

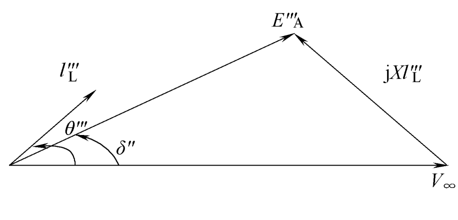


图 4-40　以超前功率因数运行的发电机相量图

$$P_{mech}=P_{3\phi}=3\frac{E'''_{A(L\text{-}N)}V_{\infty(L\text{-}N)}}{X_s}\sin\delta'''=3V_{\infty(L\text{-}N)}I'''_L\cos\theta''' \quad (4\text{-}34)$$

$$Q_{3\phi}=-3V_{\infty(\text{L-N})}I'''_{\text{L}}\sin\theta''' \tag{4-35}$$

现在发电机运行在超前功率因数，如图 4-40 所示。

例 4.5 同步电抗为 0.1Ω 的 440V 发电机，以单位功率因数为 2kW 负荷供电，求：

1）$k=0.25\text{V}\cdot\text{s}/(\text{rad}\cdot\text{A})$（$E_f=k\cdot\omega_s\cdot I_f$）情况下的励磁电流。

2）负荷功率因数为 0.85 滞后，且发电机有 4 个磁极情况下的励磁电流。

解

1）相电流 $=I_L=\dfrac{P}{\sqrt{3}\cdot V_L\cdot\cos\theta}=\dfrac{2000}{\sqrt{3}\times440\times1}\text{A}=2.62\text{A}$

励磁电磁场（电动势 emf）为

$$\text{emf}=E_f=V_{ph}+I_{ph}\cdot X_s=\frac{440}{\sqrt{3}}\angle0°\text{V}+2.62\angle0°\times0.8\angle90°\text{V}=254.04\angle0.47°\text{V}$$

$$\omega_s=2\cdot\pi\cdot\frac{2f}{p}=2\cdot\pi\times\frac{2\times60}{4}\text{rad/s}=188.5\text{rad/s}$$

励磁电流 $=I_f=\dfrac{E_f}{k\cdot\omega_s}=\dfrac{254.04}{0.25\times188.5}\text{A}=5.39\text{A}$

2）相电流 $=I_L=\dfrac{P}{\sqrt{3}\cdot V_L\cdot\cos\theta}=\dfrac{2000}{\sqrt{3}\times440\times1}\text{A}=2.62\text{A}$

励磁电动势

$$\begin{aligned}\text{emf}&=E_f=V_{ph}+I_{ph}\cdot X_s\\&=\frac{440}{\sqrt{3}}\angle0°\text{V}+3.08\angle(\arccos0.85)\times0.8\angle90°\text{V}=255.34\angle0.47°\text{V}\end{aligned}$$

励磁电流 $=I_f=\dfrac{E_f}{k\cdot\omega_s}=\dfrac{254.34}{0.25\times188.5}\text{A}=5.42\text{A}$

可以看出，需要增加磁场电流以给滞后功率因数负荷供电（过励磁）。

例 4.6 例 4.5 中的发电机，若不影响输入到发电机的机械功率，且励磁电流减小到 5.093A，求负荷的功率因数角。

解

由于输入机械功率维持不变，有功功率值不变。

励磁电动势 $\text{emf}=E_f=k\cdot\omega_s\cdot I_f=0.25\times188.5\times5.093\text{V}=240\text{V}$

$$P=\frac{3\cdot|E_f|\cdot|V_{ph}|\cdot\sin\delta}{|X_s|}$$

$$\Rightarrow\delta=\arcsin\left(\frac{P\cdot|X_s|}{3\cdot|E_f|\cdot|V_{ph}|}\right)=\arcsin\left(\frac{2000\times0.8}{3\times240\times440/\sqrt{3}}\right)=0.50°$$

$$E_f=V_{ph}+I_{ph}\cdot X_s$$

$$\Rightarrow240\angle0.5°=\frac{440}{\sqrt{3}}\angle0+I_{ph}\angle\arccos\theta\times0.8\angle90°$$

$$\Rightarrow I_{\text{ph}}\angle\arccos\theta=\frac{1}{0.8\angle 90^\circ}\left(240\angle 0.5^\circ-\frac{440}{\sqrt{3}}\angle 0\right)\text{A}=17.74\angle 81.51^\circ\text{A}$$

例 4.6 说明，励磁电流从对应单位功率因数的值减小（欠励）会导致功率因数超前。

结论是，减小励磁电流 I_f 会使提供的电流超前电压，因此发电机可以运行在超前功率因数而发出相同有功功率。

正如从上述分析看到的，智能电网的发电机是三端设备。机械功率输入到发电机，励磁电压由调压器控制——发电机的功率因数由励磁电流的设置得到。这些条件决定了发电机供给的有功及无功功率。还应该记住，在运行期间可以重新设置发电机发出的功率，因为 AGC 可以维持负荷与发电之间的平衡，如式（4-36）、式（4-37）及图 4-41 所示。

$$\sum_{i=1}^{n} P_{Gi}=\sum_{i=1}^{n} P_{Li}+P_{\text{losses}} \tag{4-36}$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{Gi}=\sum_{i=1}^{n} Q_{Li}+Q_{\text{losses}} \tag{4-37}$$

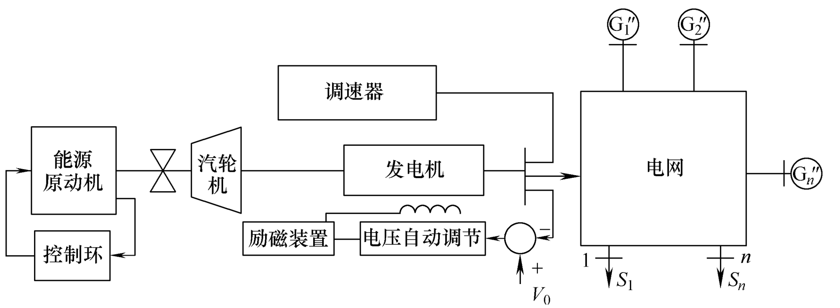


图 4-41　作为互联电网一部分的发电机运行[11]

现在回顾一下智能电网系统设计的基本宗旨：以最低价格提供合格电力，且通过保持电力系统稳定保证供电连续性。电力系统稳定问题很复杂，需要研究如何建立电网中每个元件的动态模型并定义研究的时间尺度。然而，我们已经讨论了贯穿 AGC 与 LFC 静态稳定性的某些方面，电力系统暂态稳定性的研究要求更多深入的、用能源动力学表示的电力系统建模。对于如何给系统负荷提供额定电压的研究，智能电网的设计要求使用对称的电力系统静态模型。到目前为止我们已经研究了如何建立变压器、负荷及发电机的标幺值模型，我们将使用这些模型去构建系统模型。

4.14　电网建模

为了构建智能电网，需要用标幺值系统表示电网元件[21]。电网的每个元

件都有它的电压、功率和阻抗额定值，额定值给用户提供了安全使用元件的信息，因此需要选择共用系统的功率基值，并把电网的所有元件折算到相同共用基值[19-20]。

有两个基本的工程设计问题需要使用电力系统模型：潮流研究和短路研究。潮流研究是计划将所有电源发出的电力注入电网以满足计划的系统负荷。它的目标是计算母线电压。对短路研究来说，我们已经解决了潮流研究问题，且母线电压是已知的。母线负荷用它们的阻抗模型代替，短路研究的目标是研究“如果-则”条件，对电力系统任意位置的故障计算故障电流及断路器的短路电流开断能力。计划发电的电源可以是常规发电厂、风能及太阳能等可再生能源，或燃料电池、生物质能、燃气轮机等其他绿色能源。潮流研究中，电源用功率注入点表示，电压计算中不考虑电源内阻抗。目前，潮流研究中使用的发电机模型种类很多，但基本模型是：P_G 和 Q_G 为常数的模型，及 P 和 V 为常数的模型。P 及 Q 为常数的模型中，给定注入电力网络的功率，计算母线电压的幅值及相角。第 7 章将讨论用于潮流研究的电力网络建模。

图 4-42 表示一个八母线电网系统。正如所看到的，光伏及风力发电机的变压器通过接地电抗接地。接地电抗的作用是系统中一旦发生单相接地故障，限制并检测接地电流。△-Y 联结变压器用于将输出电压升至输电线路电压，断路器的安装位置选择是当维修及发生不可预见故障时隔离一部分系统。△-Y 变压器 T_1、T_2 也提供隔离并限制系统中的接地电流。因为功率要传送给负荷，所以△-Y 变压器 T_3 提供低电压。此外，变压器 T_3 是接地的△-Y 联结，还为负荷侧提供接地系统。

图 4-42 电力系统的阻抗图如图 4-43 所示。阻抗图描述的是系统的对称运行。因为系统是对称的，其中性点的电压和为零，系统中没有接地电流流过。然而，如果系统中发生单相接地故障，就需要对三相不对称系统建模。不对称系统建模将在第 8 章讨论。

对于短路研究，使用母线电压及母线负荷的有功及无功功耗计算负荷电流。负荷阻抗模型由母线电压与母线负荷电流比给出，如式（4-38）所示：

$$S = V \cdot I^*$$
$$I = (S/V)^*$$
$$Z_{\text{load}} = V/I \tag{4-38}$$

图 4-43 的阻抗图不能用于潮流研究，因为母线电压未知，不能计算负荷阻抗。然而对于短路研究，我们关心的是故障电流计算。发电机、电动机及负荷的内阻抗应包含在电网模型中，因为内阻抗会限制故障电流。潮流研究中需要把发电机及负荷表示为注入功率模型。

例 4.7 考虑图 4-44 给出的微电网。

图中给出了输电线路阻抗。

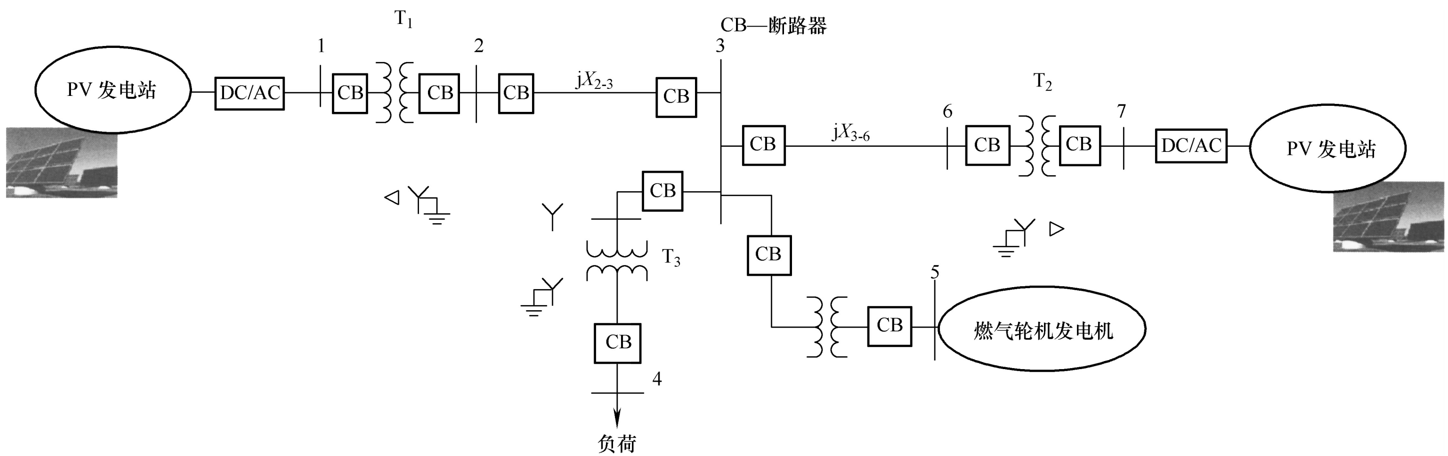


图 4-42　一个八母线电网系统

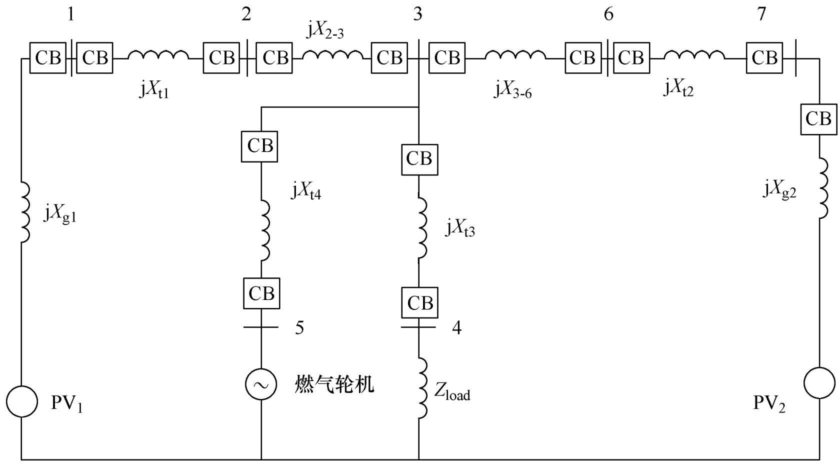


图 4-43　图 4-42 的阻抗图

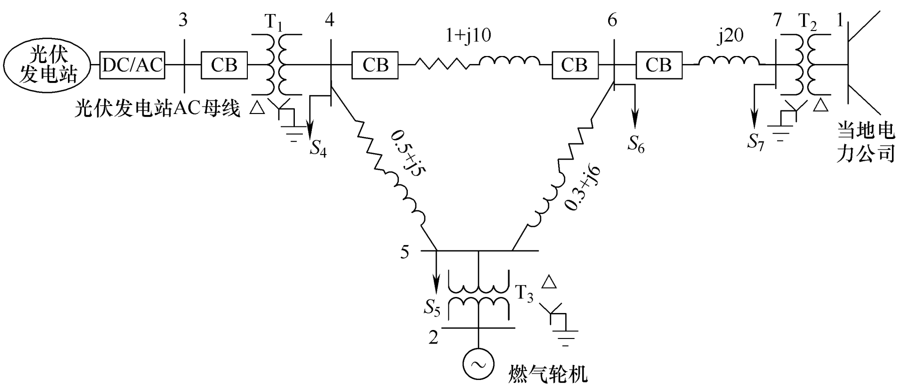


图 4-44　例 4.7 的单线图

系统数据为

光伏发电站：2MW，DC460V，7%电抗

燃气轮机发电站：10MVA，3.2kV，10%电抗

变压器 T_1：10MVA，460V/13.2kV，7%电抗

变压器 T_2：25MVA，13.2kV/69kV，9%电抗

变压器 T_3：20MVA，13.2kV/3.2kV，8%电抗

负荷 S_4：4MW，功率因数为 0.9 滞后

负荷 S_5：8MW，功率因数为 0.9 滞后

负荷 S_6：10MVA，功率因数为 0.9 超前

负荷 S_7：5MVA，功率因数为 0.85 滞后

假设当地电源内电抗等于 10Ω 且忽略内电阻，选择变压器 T_2 额定值为基值。

做出：

1）用于潮流研究的标幺值阻抗模型。

2）用于短路研究的标幺值阻抗模型。

解

选变压器 T_2 的额定值为基值，则功率基值为

$$S_b = 25\text{MVA}$$

光伏发电站侧电压基值 $V_b = 460\text{V}$，因此输电线路侧电压基值为 $V_b = 13.2\text{kV}$。

阻抗基值由下式给出：

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{13.2^2}{25}\Omega = 6.97\Omega$$

1）新基值下标幺值阻抗由下式给出：

$$Z_{pu,new} = Z_{pu,old} \times \frac{S_{b,new}}{S_{b,old}} \times \left(\frac{V_{b,old}}{V_{b,new}}\right)^2$$

因此，变压器 T_1 新的标幺值阻抗为

$$Z_{3\text{-}4} = jX_{pu} = j0.07 \times \frac{25}{10} \times \left(\frac{13.2}{13.2}\right)^2$$

$$= j0.175\text{pu}$$

因为变压器 T_2 额定值被选为基值，因此它的标幺值阻抗仍然是

$$Z_{1\text{-}7} = j0.09\text{pu}$$

因此变压器 T_3 的新标幺值阻抗为

$$Z_{2\text{-}5} = jX_{pu} = j0.08 \times \frac{25}{20} \times \left(\frac{13.2}{13.2}\right)^2$$

$$= j0.1\text{pu}$$

表 4-3 给出了变压器的阻抗标幺值。

表 4-3　变压器的阻抗标幺值

变压器编号	阻　　抗	阻抗标幺值
1	$Z_{3\text{-}4}$	j0.175
2	$Z_{1\text{-}7}$	j0.09
3	$Z_{2\text{-}5}$	j0.1

线路阻抗的标幺值由下式给出：

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}$$

表 4-4 给出了输电线路的阻抗标幺值。

系统的负荷标幺值由下式给出：

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b}$$

表 4-5 给出了负荷的标幺值。

表 4-4 输电线路的阻抗标幺值

线 路	阻抗/Ω	标幺值阻抗
4-5	$Z_{4\text{-}5}=0.5+\mathrm{j}5$	0. 072 + j717
4-6	$Z_{4\text{-}6}=0.5+\mathrm{j}10$	0. 143 + j1. 434
5-6	$Z_{5\text{-}6}=0.3+\mathrm{j}6$	0. 043 + j0. 861

表 4-5 负荷标幺值

母 线 编 号	负荷/MVA	负荷标幺值
4	$S_4=-4-\mathrm{j}1.94$	−0. 16 − j0. 078
5	$S_5=-8-\mathrm{j}3.87$	−0. 32 − j0. 155
6	$S_6=-10+\mathrm{j}4-84$	−0. 40 + j0. 194
7	$S_7=-5-\mathrm{j}3.10$	−0. 20 − j0. 124

图 4-45 给出了例 4. 7 用于潮流研究的系统标幺值模型。

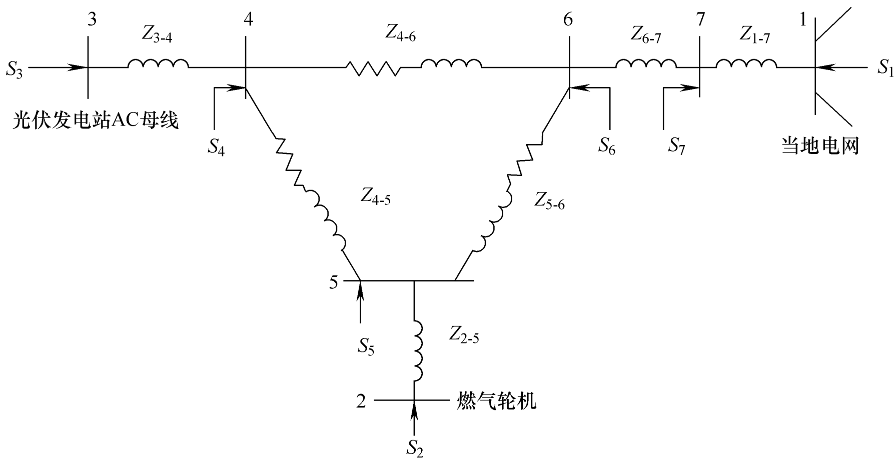


图 4-45 潮流研究模型

2）对于短路研究，发电机内阻抗也包含在模型中。

新基值下的光伏电站标幺值阻抗为

$$Z_{3'\text{-}3}=\mathrm{j}X_{\mathrm{pu}}=\mathrm{j}0.07\times\frac{25}{2}\times\left(\frac{13.2}{13.2}\right)^2$$

$$=\mathrm{j}0.875\mathrm{pu}$$

燃气轮机的新标幺值阻抗为

$$Z_{2'\text{-}2}=\mathrm{j}X_{\mathrm{pu}}=\mathrm{j}0.1\times\frac{25}{10}\times\left(\frac{13.2}{13.2}\right)^2$$

$$= j0.25\text{pu}$$

当地电网的新标幺值阻抗为

$$Z_{1'\text{-}1} = Z_{\text{pu}} = \frac{Z}{Z_{\text{b}}} = \frac{j10}{6.97} = j1.43\text{pu}$$

表 4-6 给出了发电机的内阻抗标幺值。

表 4-6　发电机的内阻抗标幺值

发　电　机	阻　　抗	标幺值阻抗
当地电网	$Z_{1'\text{-}1}$	j1.43
燃气轮机	$Z_{2'\text{-}2}$	j0.25
光伏发电站	$Z_{3'\text{-}3}$	j0.875

图 4-46 给出了用于短路研究的标幺值模型，变压器及输电线路的阻抗标幺值分别在表 4-3 及表 4-4 中给出。

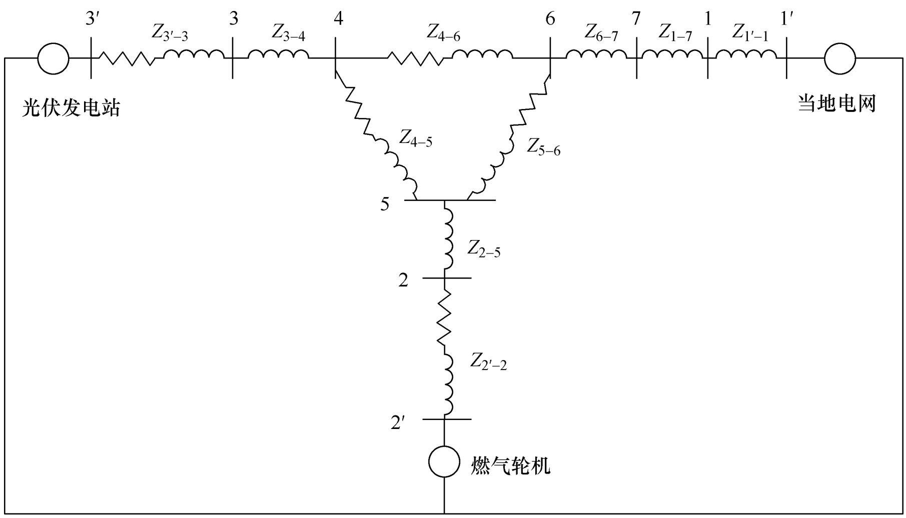


图 4-46　短路研究模型

本章介绍了电网的基本运行及如何建立用于智能电网分析和设计的电网模型；介绍了智能电网重要元件及负荷动态特性，包括每日运行期间负荷变化如何影响电价；强调了发电机及电动机的内阻抗对限制电网故障电流的重要性；最后，提出了电网设计的潮流研究及短路研究的问题。下一章将研究智能微电网可再生能源系统的设计。

习　　题

4.1　一台三相，额定值为 440V，20kVA 的发电机通过阻抗为 4 + j15Ω 的电缆连接到以下两

个负荷：

1）额定值为440V，8kVA，三相，Y联结电动机负载，功率因数为0.9滞后。

2）额定值为440V，6kVA，三相，△联结电动机负载，功率因数为0.85滞后。

若电动机负荷电压为440V，求所要求的发电机端电压。

4.2 一台发电机，额定值为100MVA，20kV，60Hz，功率因数为0.8滞后，10%电抗，计算：

1）负荷为50%的发电机标幺值模型。

2）负荷为100%的发电机标幺值模型。

3）若发电机轴转速为120r/min，求它的极数。

4.3 列表表示极数分别为2、4和6的交流电机运行在50Hz、60Hz及400Hz时的磁场转速。

4.4 一台20MVA三相发电机，额定值为20kV，60Hz，在额定电压下向当地电网供电。电机向当地电网输送额定功率，其同步电抗等于8Ω并忽略电阻。

计算：

1）当电机运行在功率因数为0.85滞后时，其励磁电压。

2）当电机运行在功率因数为0.85超前时，其励磁电压。

3）当电机运行在单位功率因数时，其励磁电压。

4）对于1）、2）和3），电机能输出的最大功率。

4.5 习题4.4中，假设负荷为5000W，单位功率因数，计算标幺值等效电路，设 S_b = 100MVA，V_b = 345kV。

4.6 一台两极、Y联结发电机、额定值为13.8kV，20MVA，功率因数为0.8超前，以1800r/min运行。发电机每相同步电抗为8Ω（60Hz），忽略每相电枢电阻，发电机在互联电力网中并联运行。求：

1）额定条件下发电机的转矩角是多少？

2）这台发电机最大可能发出功率是多少？

4.7 一台三相、八极，220MVA，13.2kV，功率因数为0.9滞后，Y联结的同步发电机，以1200r/min运行。它在60Hz下每相同步电抗为0.8Ω。发电机带满负荷、以额定电压为电网供电。计算发电机的电压调节。

4.8 电网单线图如图4-47所示，系统数据如下：

母线2和3之间的输电线路电抗为j10Ω，母线3和5之间为j6Ω；

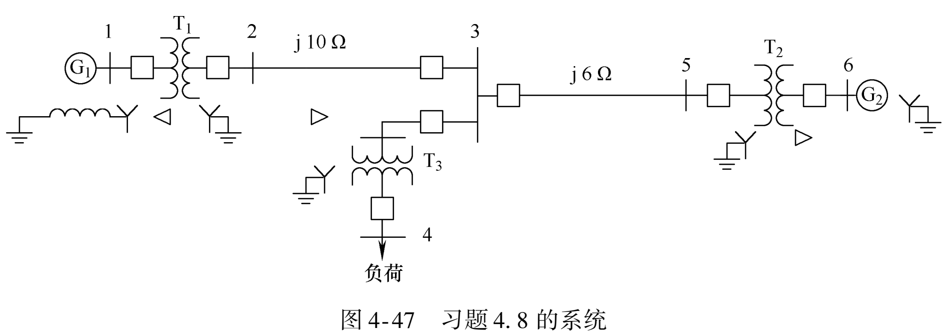


图4-47 习题4.8的系统

G_1 风力发电系统，25MVA，13.2kV，标幺值电抗 0.20；

G_2 燃气轮机发电系统，50MVA，20kV，标幺值电抗 0.20；

变压器 T_1，100MVA，220（丫）/13.8（△）kV，10% 电抗；

变压器 T_2，200MVA，220/20kV，10% 电抗；

变压器 T_3，100MVA，220（丫）/20（丫）kV，10% 电抗。

求：

1）用于短路研究的标幺值阻抗模型。

2）用于潮流研究的标幺值阻抗模型。

4.9　电网单线图如图 4-48 所示，电网数据已在图中给出。

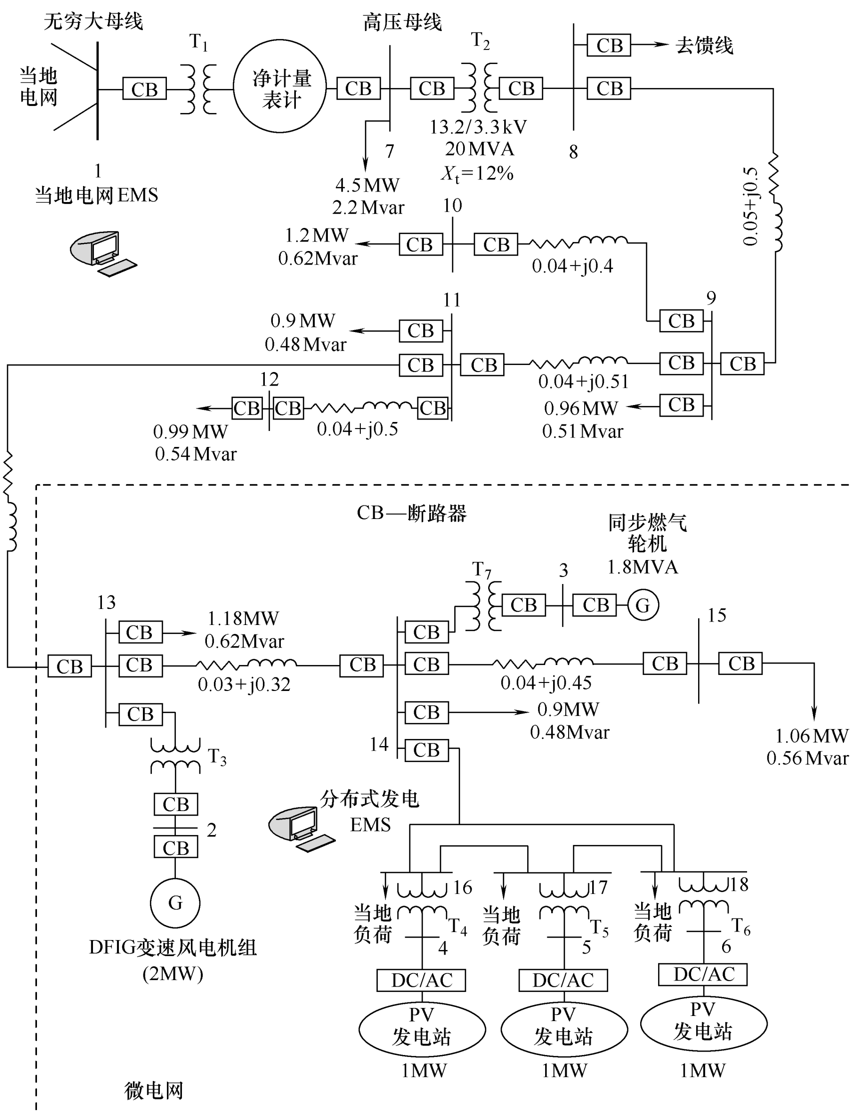


图 4-48　习题 4.9 的系统

设容量基值为100MVA，电压基值13.2kV；同时假设基于变压器 T_1 的当地电网输入电抗为10%，所有电源的输入电抗为7%，以它们的额定值作为基准。

系统数据为

变压器 T_1：20MVA，33/13.2kV，10%电抗；

变压器 T_2：20MVA，13.2/3.3kV，12%电抗；

变压器 T_3：5MVA，3.3kV/460V，6.5%电抗；

变压器 T_4、T_5 及 T_6：2MVA，3.3kV/460V，6.5%电抗；

变压器 T_7：5MVA，3.3kV/460V，6%电抗；

表4-7给出了输电线路阻抗。

当地负荷为1MVA，功率因数为0.85滞后。

求：

1）用于潮流研究的标幺值模型。

2）用于短路研究的标幺值模型。

表4-7　习题4.9的输电线路数据

线　　路	电阻/Ω	串联电抗/Ω
8-9	0.05	0.5
9-10	0.04	0.4
9-11	0.04	0.51
11-12	0.04	0.5
11-13	0.01	0.12
13-14	0.03	0.32
14-15	0.04	0.45

4.10　考虑图4-49给出的微电网，假设其数据如下：

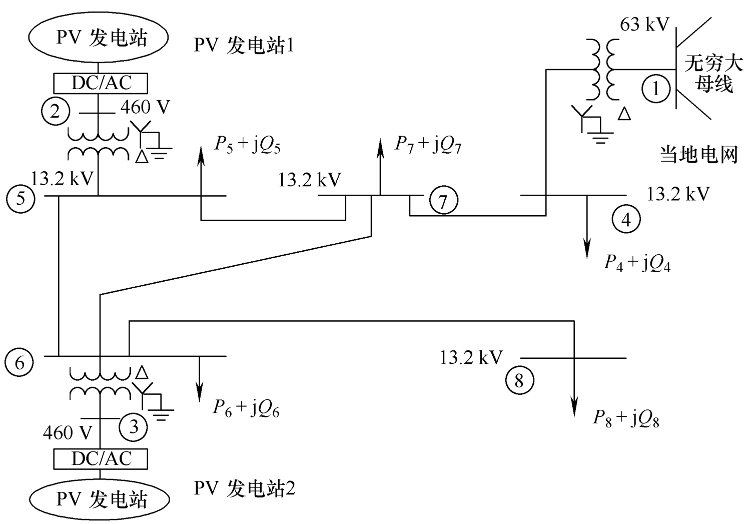


图4-49　习题4.10的光伏微电网

1）与光伏发电站连接的变压器，额定值及联结方式为低压侧 460V，Y-接地；高压侧 13.2kV，△联结，10% 电抗，容量 10MVA。连接到电网的变压器为 13.2/63kV，10MVA，10% 电抗。

2）母线 4 负荷为 1.5MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 5 负荷为 2.5MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 6 负荷为 1.0MW，功率因数为 0.95 滞后；母线 7 负荷为 2MW，功率因数为 0.95 超前；母线 8 负荷为 1.0MW，功率因数为 0.9 滞后。

3）输电线路电阻为 0.0685Ω/mile，电抗为 0.40Ω/mile，线路充电导纳的 1/2（$Y'/2$）为 $11\times10^{-6}\Omega^{-1}$/mile，线路 4-7 长为 5mile，线路 5-6 长为 3mile，线路 5-7 长为 2mile，线路 6-7 长为 2mile，线路 6-8 长为 4mile，输电线路模型如图 4-50 所示。

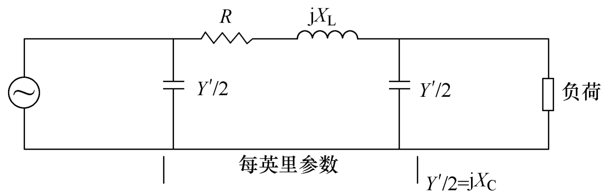


图 4-50　π 形输电线路

4）光伏发电站 1 额定容量为 0.75MW，光伏发电站 2 额定容量为 3MW，光伏发电站都运行在单位功率因数。

5）光伏发电站功率基值 S_{base} 为 10MW，电压基值为 460V，当地电网母线电压容许偏差为 5%。

求：

1）用于潮流研究的标幺值模型。

2）用于短路研究的标幺值模型。

4.11　考虑图 4-51 给出的光伏发电系统，PV_1 内电抗为 0.8pu，将 1pu 功率注入电网；PV_2 内电抗为 0.4pu，将 0.5pu 功率注入电网；负荷有功与无功功率都是 1pu。

求：

1）用于短路研究的标幺值模型。

2）用于潮流研究的标幺值模型。

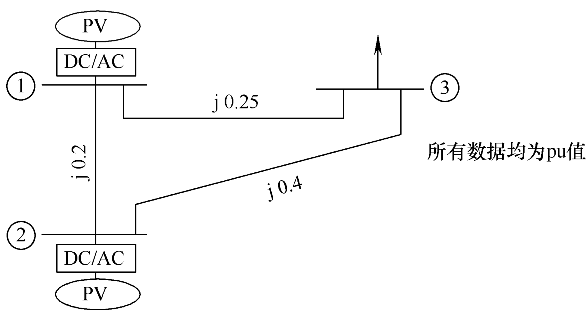


图 4-51　习题 4.11 的单线图

4.12 假设供电最大负荷为8MW，平均负荷为6MW，计算其负荷系数。

4.13 假设一个月内每日负荷廓线相同，日平均负荷为170MW，峰值负荷为240MW，计算一个月的日运行供电负荷系数。

4.14 如果例4.3中由额定容量为80MW的风力发电及额定容量为500MW的中心发电站供电，假设风力发电的资本成本是500美元/kW，中心电站的资本成本为100美元/kW。如果除去风电维修费用1美分/kWh外，风能资源无其他成本；中心发电站的燃料和维修成本为3.2美分/kWh，计算EUC，并给出使用5年、负荷系数为0~1的EUC图。

4.15 如果例4.3中由总额定容量为2MW的10个燃料电池及总额定容量为6MW的20个微汽轮机供电。假设燃料电池的资本成本为1000美元/kW，微汽轮机的资本成本为200美元/kW。如果燃料电池的可变成本为15美分/kWh，微汽轮机的可变成本为2.2美分/kWh，假设运行5年，计算燃料资源的EUC。画出EUC作为时间的函数、负荷系数为0~1的图形。

参考文献

1. Institute for Electric Energy. Homepage. Available at http://www.edisonfoundation.net/IEE. Accessed 2010 Oct 7.
2. MISO-MAPP Tariff Administration. Transition guide. Available at http://toinfo.oasis.mapp.org/oasisinfo/MMTA_Transition_Plan_V2_3.pdf. Accessed 2010 Jan 12.
3. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov. Accessed 2010 Oct 29.
4. Carbon dioxide Information Analysis Center. Frequently asked global change questions. Available at http://www.cdiac.ornl.gov/pns/faq.html. Accessed 2009 Sept 29.
5. Shahidehpour M, Yamin H. Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management. New York/Piscataway, NJ: Wiley/IEEE; 2002.
6. Hirst E, Kirby B. Technical and market issues for operating reserves. Available at http://www.ornl.gov/sci/btc/apps/Restructuring/Operating_Reserves.pdf. Accessed 2009 Jan 10.
7. Keyhani A, Miri SM. On-line weather-sensitive and industrial group bus load forecasting for microprocessor-based applications. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983; 102(12):3868–3876.
8. Schweppe, FC. Power systems 2000: hierarchical control strategies. IEEE Spectrum, 1978; 15(7): 42–47.
9. North American Electric Reliability Council. NERC 2008 Long Term Reliability Assessment 2008–2017. Available at http://www.nerc.com/files/LTRA2008.pdf. Accessed 2010 Oct 8.
10. Wood AJ, Wollenberg, BF. Power generation, operation, and control. New York: Wiley; 1996.
11. Babcock & Wilcox Company. Steam its generation & use. 38th ed. Charlotte, NC: Babcock & Wilcox; 1975.
12. Nourai A, Schafer C. Changing the electricity game. IEEE Power and Energy Magazine 2009; 7(4):42–47.
13. Ko WH, Fung CD. VLSI and intelligent transducers. Sensors and Actuators 1982; 2:239–250.

14. De Almeida AT, Vine, EL. Advanced monitoring technologies for the evaluation of demand-side management programs. IEEE Transactions on Power Systems 1994; 9(3):1691–1697.
15. Adamiak M. Phasor measurement overview. Available at http://phasors.pnl.gov/Meetings/2004%20January/Phasor%20Measurement%20Overview.pdf. Accessed 2010 Oct 24.
16. Phadke, AG. Computer applications in power. IEEE Power & Energy Society 1993; 1(2):10–15.
17. Schweppe FC, Wildes J. Power system static-state estimation, part I: exact model power apparatus and systems. IEEE Transactions on Volume 1970; PAS-89(1): 120–125.
18. Ducey R, Chapman R, Edwards S. The U. S. Army Yuma Proving Ground 900-kVA Photovoltaic Power Station. Available at http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PDF/YUMADOC.PDF. Accessed 2010 Oct 10.
19. Grainger J, Stevenson WD. Power systems analysis. New York: McGraw Hill; 2008.
20. Gross AC. Power system analysis. New York: Wiley; 1986.
21. Keyhani A, Marwali M, Dai M. Integration of green and renewable energy in electric power systems. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
22. Majmudar H. Electromechanical energy converters. Boston: Allyn and Bacon; 1965.

补充文献

Anderson PM, Fouad AA. Power system control and stability. 1st ed. Ames, IA: Iowa State University Press; 1977.

Anderson R, Boulanger A, Johnson JA, Kressner A. Computer-aided load management for the energy industry. Tulsa, OK: Pennwell; 2008. p 333.

Berger AW, Schweppe FC. Real time pricing to assist in load frequency control. IEEE Transactions on Power Systems 1989; 4(3):920–926.

Bohn R, Caramanis M, Schweppe F. Optimal pricing in electrical networks over space and time. Rand Journal on Economics 1984; 18(3):360–376.

Caramanis M, Bohn R, Schweppe F, Optimal spot pricing: practice & theory. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1982; PAS-101(9):3234–3245.

Chapman S. Electric machinery and power system fundamentals. New York: McGraw Hill; 2003.

Dowell LJ, Drozda M, Henderson DB, Loose VW, Marathe MV, Roberts, DJ. ELISIMS: comprehensive detailed simulation of the electric power industry. Available from: Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM; Tech. Rep. No. LA-UR-98-1739.

Electricity Storage Association. Technologies & Applications: Flywheels. Available at http://electricitystorage.org/tech/technologies_technologies_flywheels.htm. Accessed 2010. Oct 10.

Elgerd OI. Electric energy system theory: an introduction. 2d ed. New York: McGraw-Hill; 1982.

El-Hawary, ME. Electric power systems: design and analysis. Reston, VA: Reston Publishing; 1983.

IEEE Brown Book. IEEE recommended practice for power system analysis. New York: Wiley-Interscience; 1980.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std 1451.1-1999, standard for a smart transducer interface for sensors and actuators–network capable application processor (NCAP) Information Model. Piscataway, NJ: IEEE; 1999.

Masters GM. Renewable and efficient electric power systems. New York: Wiley; 2004.

Nourai A. Large-scale electricity storage technologies for energy management. In: Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1; July 25, 2002; Chicago, IL. Piscataway, NJ: IEEE; 2002. p 310–315.

Schweppe F, Caramanis M, Tabors R, Bohn R. Spot pricing of electricity. Alphen aan den Rijn, the Netherlands: Kluwer; 1988.

Schweppe F, Tabors R, Kirtley J, Outhred H, Pickel F, Cox A. Homeostatic utility control. IEEE Transactions on Power Applications and Systems 1980; PAS-99(3): 1151–1163.

第 5 章　太阳能微电网系统

5.1　引言

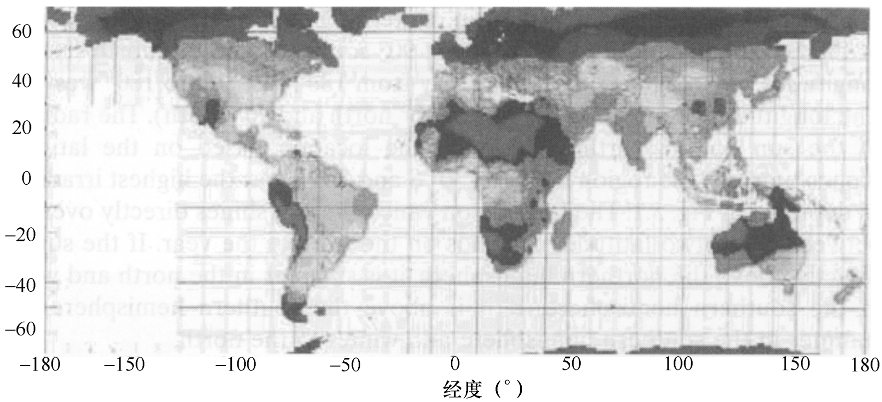
从有记录的历史开始，人类就膜拜太阳。埃及的第一个国王 Ra 自称太阳神。美索不达米亚的正义太阳神是夏马西（Shamash）。在印度文化中，太阳神苏里亚（Surya）被尊奉为人类的祖先。阿波罗（Apollo）和赫利俄斯（Helios）是古希腊的两个太阳神。太阳在琐罗亚斯德教（Zoroastrianism）（伊朗）、佛教（亚洲）的宗教文化，以及阿兹特克（Aztec）（墨西哥）和印加（Inca）（秘鲁）文化中也起了重要作用[1]。

太阳能是地球上生命的主要能量来源。当太阳从宇宙中消失时，我们也将不复存在[2]。太阳能是一个一直存在的可再生能源；它以电磁波（辐照）的形式到达地球。很多因素影响地球上一个给定区域的辐照度总量。这些因素包括位置、季节、湿度、温度、大气质量以及在一天里所处的时间。日照指的是暴露在太阳光下，如日照这个词曾经被用来表示一个给定区域在给定时间内接收到的太阳辐照能量。人们也使用词组太阳入射辐照度表示每平方米的平均辐照度，以单位 W/m^2 或 kW/m^2 表示。

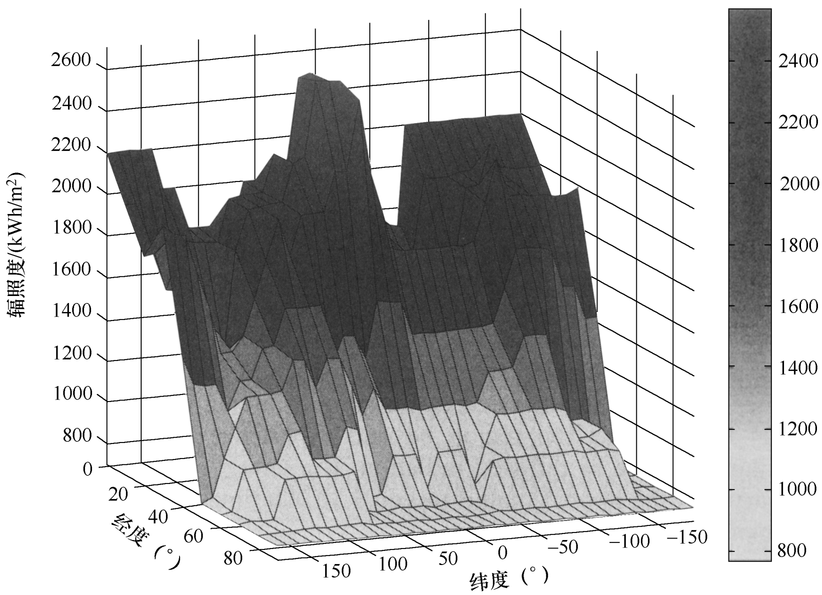
如图 5-1a 所示，地球表面的坐标由纬度和经度这些假想线表示。地球表面纬度是假想的平行线，单位为度。纬度线与赤道平行，纬度在 90°S～90°N 范围之间变化。经度是变化范围在 180°E～180°W 之间的假想线。经度线在两极交汇（90°N 和90°S）。地球上太阳辐照度根据所在地区纬度而变化。一般来说，在 30°S～30°N 的地区辐照度最高，如图 5-1 所示。在这两个纬度之间，太阳光直射的纬度由一年中不同时间确定。如果太阳位于北半球上方，那么北半球是夏天而南半球是冬天。如果位于南半球上方，则南半球是夏天而北半球是冬天。

图 5-1b 是地球上根据经纬度标志的不同区域辐照度图。纬度在 −90°～90°之间变化，分别对应 90°N 和 90°S。类似地，经度在 −180°～180°之间变化，分别对应 180°W 和 180°E。图片上的 z 轴是辐照度，单位为 kWh/m^2。z 轴上的点表示辐照度总量。图 5-1b 上的不同颜色代表辐照度。

地球上 15°N～35°N 之间的区域是太阳能最丰富的地区。从图 5-1b 和图 5-1c 可以看出，这个半干旱地区大部分位于非洲、美国西部、中东和印度境内。这些地方每年有超过 3000h 的强烈日照。太阳能辐照度总量第二大地区在 15°N 到赤道之间，每年日照时间大约有 2500h。35°N～45°N 之间的带区太阳能资源有限。然而，



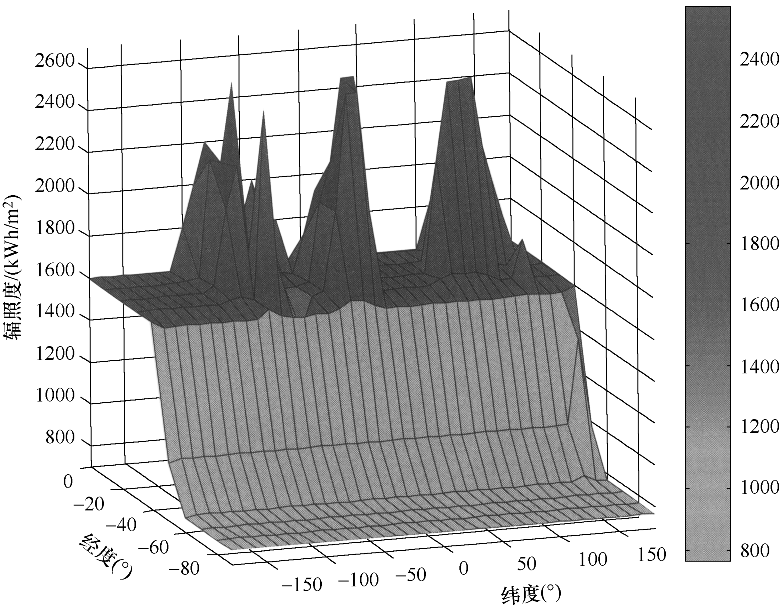
a)



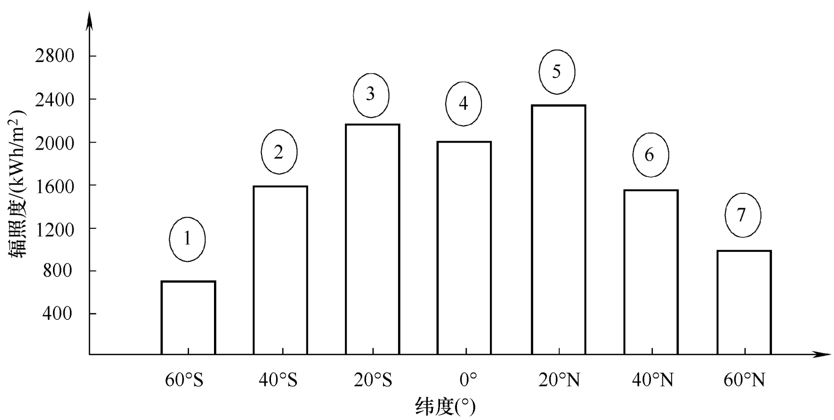
b)

图 5-1

a）地球辐照度值（kWh/m^2）[2,3] b）北半球不同经纬度处平均辐照度资源[4,9]



c)



d)

图　5-1（续）

c）南半球不同经纬度处平均辐照度资源　d）地球上不同区域平均辐照度[4,9]

区域 1：阿根廷，智利；区域 2：阿根廷，智利；区域 3：巴西，南非，秘鲁，澳大利亚，莫桑比克；区域 4：印度尼西亚，巴西，尼日利亚，哥伦比亚，肯尼亚，马来西亚；区域 5：印度，巴基斯坦，孟加拉国，墨西哥，埃及，土耳其，伊朗，阿尔及利亚，伊拉克，沙特阿拉伯；区域 6：中国，美国，日本，德国，法国，英国，韩国；区域 7：俄罗斯，加拿大，瑞典，挪威。

尽管在太阳能密度和日照小时数上有明显的季节差异，典型辐照度和其他两个地区大致相同；冬天来临时，日照强度降低；在隆冬时节，日照强度处于最低水平。超

过 45°N 的地区只有一半太阳能辐照度，称为散射辐射。地球接收到的太阳能总量大约为世界能量需求的 10000 倍[3]。

如图 5-2 所示，太阳光照的形式为紫外线、可见光和红外线。大部分能量的形式为短波，用来产生地球热循环、天气循环、风和潮汐。小部分能量被用于植物的光合作用，剩下的太阳能反射回太空。

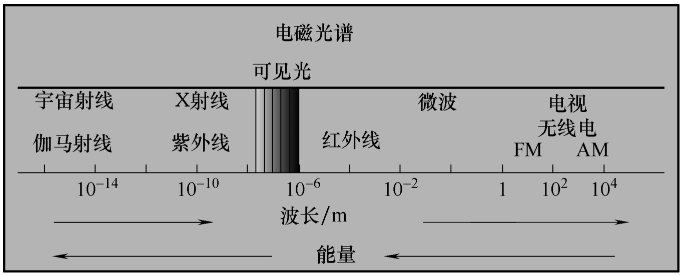


图 5-2 电磁光谱[1,2]

达到大气层的太阳能是恒定的，因此有太阳常数这个称呼。经计算，太阳常数大概值为 $1.4kW/m^2$，或 $2.0cal/(cm^2 \cdot min)$。太阳光的较短波长较长波长散射的范围更广。散射可能由气体分子、污染和雾引起。在日出和日落时，蓝色光和紫色光的大气散射最强，但不会影响阳光中的红色射线。

5.2 太阳能转换过程：热能电厂

1866 年，August Mouchout 建造了一个抛物面境将太阳能传输给蒸汽机供电[5]。今天的太阳能热电厂也是利用太阳的热能产生推动汽轮机的蒸汽功率。

太阳能集热（Concentrating Solar Power，CSP）系统具有定位透镜，可以将阳光聚集在接收器上，接收器的作用是产生蒸汽的锅炉。系统使用跟踪控制系统以获得最大效率。目前存在一些集热发电技术；经常使用的抛物面境的材料是银基材料或是抛光铝。图 5-3 为美国加利福尼亚州莫哈韦沙漠（Mojave Desert）上的一个使用抛物面镜的 CSP 系统。

塔上热处理系统导入太阳能，通过创造强烈且集中的太阳能，太阳能塔（见图 5-4）可以产生蒸汽功率[2]。这种系统使用大量太阳跟踪镜，或抛物面反射镜。镜子的数量取决于系统容量。另一类镜子称为定日镜（heliostat，从 helios 得来，太阳的希腊语）。早期太阳能塔使用水/水蒸气作为导热液体。现在大部分先进设计已经使用了硝酸盐。

法国物理学家 Augustin-Jean Fresnel（1788—1827）[7]发明了孔径更大、焦距更短的菲涅耳透镜。它的结构比传统透镜更节省材料，且可让更多光线通过。

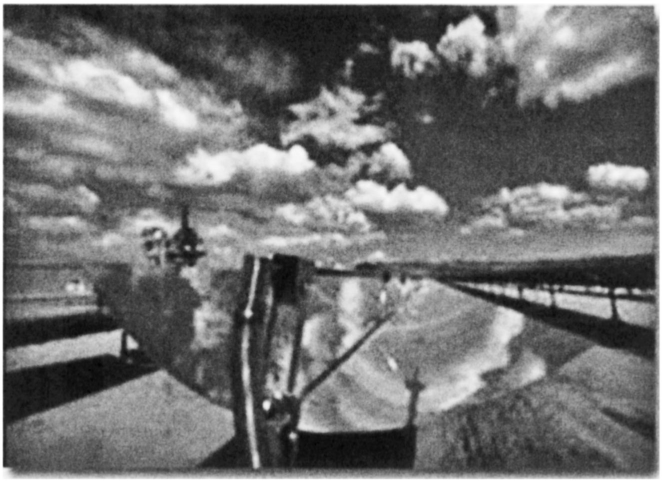


图 5-3 抛物槽集热太阳能电站[6]（美国加州能源委员会提供）

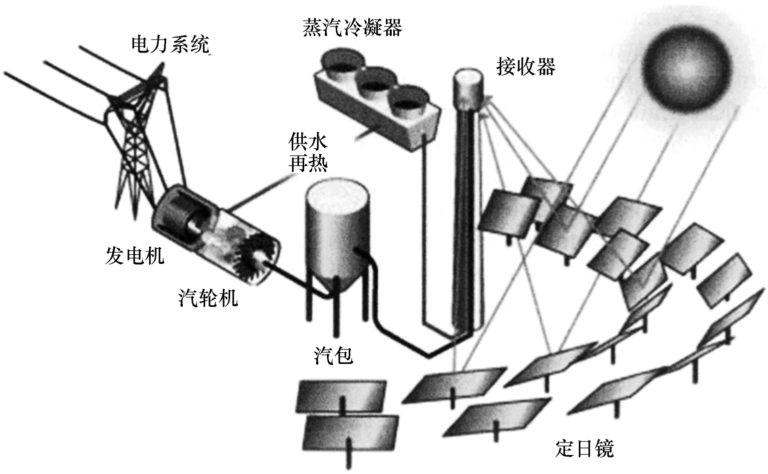


图 5-4 蒸汽太阳能电站[1]

紧凑型线性菲涅耳反射器（Compact Linear Fresnel Reflector，CLFR）用于太阳能热电厂中。CLFR 使用菲涅耳透镜和一些反射器，这些反射器位于一个独立的轴上，可聚集太阳能产生蒸汽。CLFR 使用很多薄镜带，可为热处理系统聚集高强度阳光。平面镜的生产成本远低于抛物面镜，且可在蒸汽形成中使用更多反射器。图 5-5 为一个 CLFR 电站。

另一类太阳能热机是斯特林（Stirling）发动机[1]。其工作原理是空气或其他气体等工质的循环膨胀压缩。在将热能转换为机械功的热动过程中，它使用两个不同的温度水平。斯特林太阳能碟式光热发电是一个热门研究领域[4]。

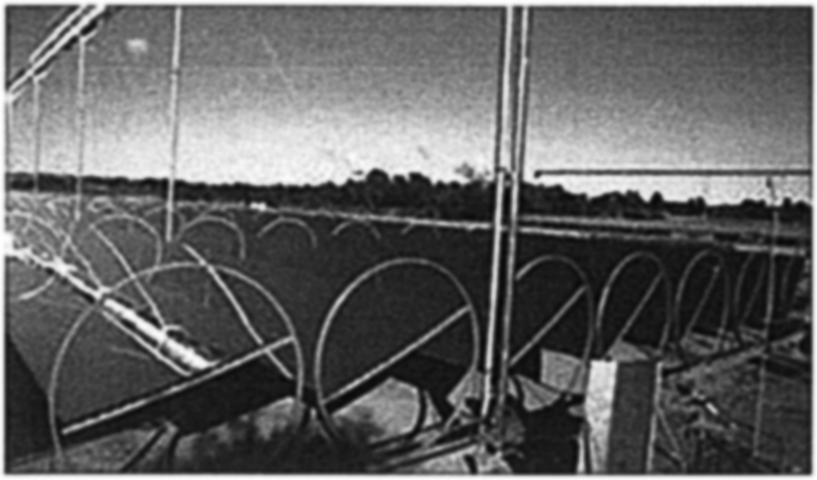


图 5-5 线性菲涅耳反射器（CLFR）太阳能集热（CSP）发电技术[2]

5.3 光伏发电转换

太阳电池可直接将辐射转换为电能。太阳电池，也称作光伏电池，是 Carlson 和 Wronski 在 1976 年发明的[8]。光伏组件由多个光伏电池组成。当阳光到达光伏组件时，电子会逃离原子。这些逃逸的电子流向太阳电池的正面。这个过程产生了正负极之间的电流。光子单胞电荷可产生的电压范围在 1.1 ~ 1.75eV（电子伏特）[2]之间。

图 5-6 为光伏电池的结构图[2]。一个光伏组件含多个串联光伏电池。可以把光伏电池看作一些由光能充电的电容器。图 5-7 显示了使用光伏电池时太阳辐照能量转换为电能的过程。

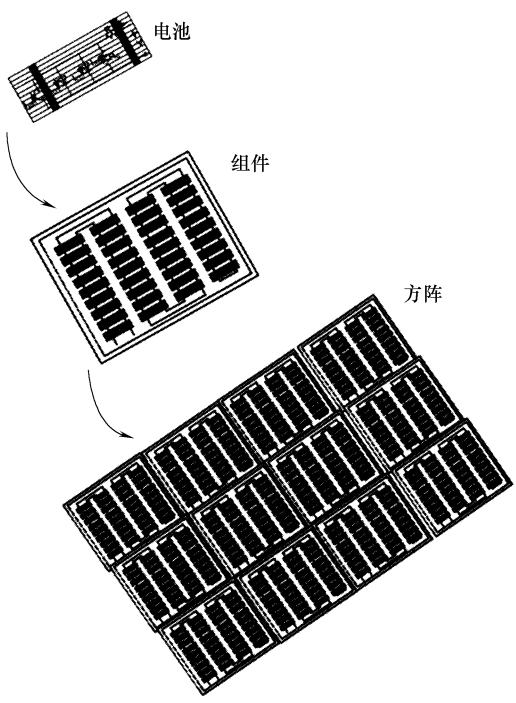


图 5-6 太阳电池或光伏电池结构[9]

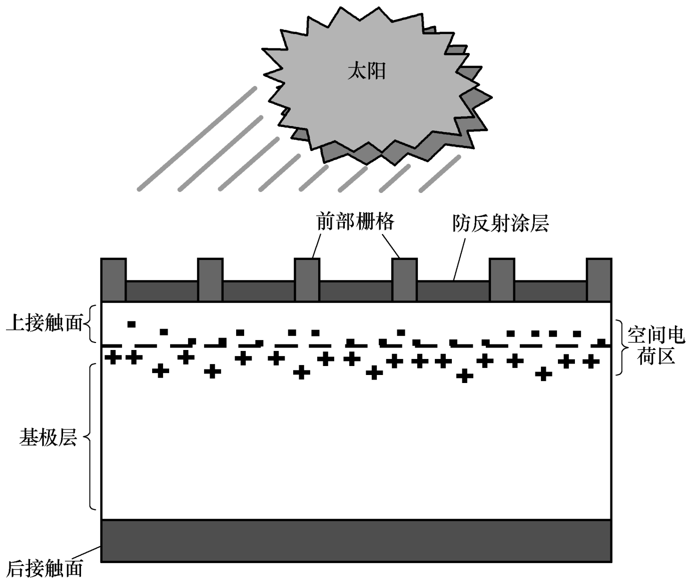


图 5-7　光伏电池结构图[2]

5.4　光伏电池材料

制造光伏电池使用的基础材料主要有两类：①可以吸收日光并转换为电子-空穴对的半导体材料；②带有结点的半导体材料，可将光生载体分离成电子和空穴。电池的上部基板和下部基板的接触面可允许电流流入外部电路。太阳电池使用的大部分半导体中，晶硅（crystalline silicon，c-Si）电池被用来吸收太阳能量。晶硅电池吸收光能的能力并不好[6]；它们的效率在 11% ~18% 范围内。最高效的单晶硅使用激光开槽、埋入式栅格接触面，它吸收阳光和采集电流的能力最强[6]。每个晶硅电池输出电压大约为 0.5V。36 个电池串联即组成输出电压 18V 的组件。在薄膜太阳电池中，晶硅片的成本很高。其他常用材料有非晶硅（amorphous silicon，a-Si）、碲化镉和镓，这是另一等级的多晶硅材料[6]。薄膜电池技术使用非晶硅 a-Si和一个 p-i-n 单序列层，在相应的 pn 型半导体材料中[10]，“p”和“n”分别指的是正、负极，“i”为界面。薄膜电池使用层压技术，这使它们在恶劣天气条件下也能使用：它的组件环境适应性很强。由于晶硅设备的基本特性，它们在未来一段时间内仍将占据光伏技术的主导地位。然而，薄膜电池技术发展迅速，新型材料或制造方法可能会取代晶硅电池的使用[8]。

本节将简要介绍目前的光伏技术。但是作为一项不断发展的技术，读者和工程师们应该认识到这些进步将来自材料工程的基础研究，也应该阅读 IEEE 综览以密切关注光伏技术的发展。下面将讨论如何开发光伏电源接入智能电网系统研究的模型。

5.5 光伏特性

当太阳辐射能量被光伏组件捕获时，组件开路电压升高[1,4]。图 5-8 中显示了输入电流为零时的开路电压 V_{OC}。如果组件短路，那么可测得最大的短路电流。图 5-8 也显示了零输出电压时的短路电流 I_{SC}。I-V 特性曲线上最大功率点（P_{MPP}）对应最大功率点电流 I_{MPP}和最大功率点电压 V_{MPP}。表 5-1 ~ 表 5-3 给出了一些光伏组件的典型参数。这些信息可用于设计光伏串和光伏电源。

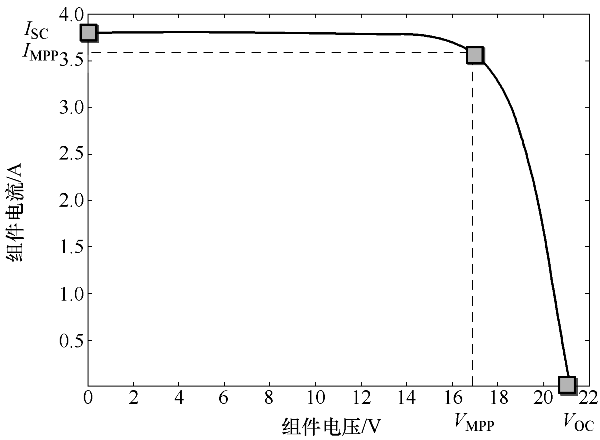


图 5-8 光伏组件运行特性[9]

表 5-1 典型光伏组件的电压和电流特性

组　　件	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
最大功率/W	190	200	170	87
最大功率点（MPP）电压/V	54.8	26.3	28.7	17.4
最大功率点（MPP）电流/A	3.47	7.6	5.93	5.02
V_{OC}（开路电压）/V	67.5	32.9	35.8	21.7
I_{SC}（短路电流）/A	3.75	8.1	6.62	5.34
效率（%）	16.40	13.10	16.80	>16
成本/美元	870.00	695.00	550.00	397.00
宽度/in	34.6	38.6	38.3	25.7
长度/in	51.9	58.5	63.8	39.6
厚度/in	1.8	1.4	1.56	2.3
重量/lb	33.07	39	40.7	18.3

表 5-2　典型光伏组件电池的温度特性

典型电池温度系数		
功率	$T_k(P_p)$	−0.47%/℃
开路电压	$T_k(V_{oc})$	−0.38%/℃
短路电流	$T_k(I_{sc})$	0.1%/℃

表 5-3　典型光伏组件的最大运行特性

极　限　值	
系统最高电压	DC600V
组件运行温度	−40～90℃
等值风阻力	风速：120m/h

光伏组件选择主要根据以下一些因素[11]：①性能担保；②组件更换方便；③符合电力和建筑规程。典型硅组件在 2.43m^2 表面可产生 300W 功率；典型薄膜电池在 0.72m^2 表面可产生 69.3W 功率。因此，硅组件需要的面积要少 35%。典型的电气数据适用于标准测试环境（STC）。例如，STC 下的组件辐照度典型值为 1000W/m^2，大气质量（AM）为 1.5，电池温度为 25℃。

图 5-9 中的光伏填充因子（Fill Factor，FF）是捕获太阳能的度量量，由光伏组件开路电压（V_{OC}）和短路电流（I_{SC}）确定。

$$FF = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{V_{OC} I_{SC}} \tag{5-1}$$

且

$$P_{max} = FF \cdot V_{OC} I_{SC} = V_{MPP} I_{MPP} \tag{5-2}$$

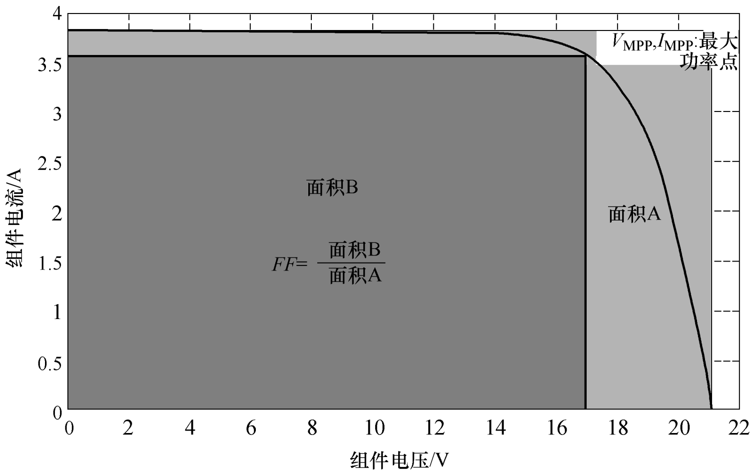


图 5-9　光伏组件的填充因子

从图 5-9 可以看出，*FF* 的最大值为 1.0。然而，这个值永远不可能达到。一些光伏组件的填充因子较高。光伏系统设计可使用高 *FF* 值的光伏组件。对于高质量光伏组件，*FF* 可能超过 0.85。典型商业光伏组件的 *FF* 值在 0.60 左右。图 5-10 的三维图是典型光伏组件在恒定辐照度下的 *I-V* 特性。可以看出，典型光伏组件特性不只和辐照度有关，也和温度有关。

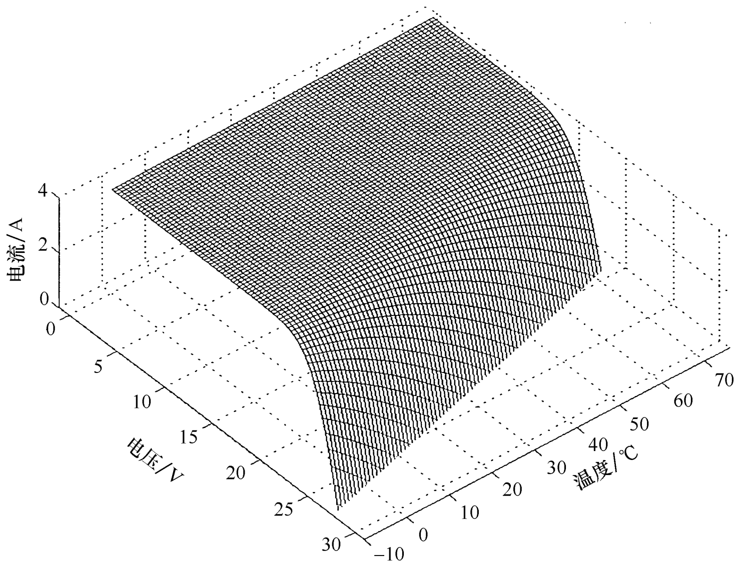


图 5-10　典型光伏组件的 *I-V-T* 三维曲线

5.6　光伏效率

光伏组件效率 η 定义为

$$\eta = \frac{V_{\mathrm{MPP}} I_{\mathrm{MPP}}}{P_{\mathrm{S}}} \tag{5-3}$$

式中，$V_{\mathrm{MPP}} I_{\mathrm{MPP}}$ 是最大输出功率 P_{MPP}，P_{S} 是组件表面积。光伏效率还可以表示为

$$\eta = FF \cdot \frac{V_{\mathrm{OC}} I_{\mathrm{SC}}}{\int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot \mathrm{d}\lambda} \tag{5-4}$$

式中，$P(\lambda)$ 是波长为 λ 的太阳能功率密度。

图 5-11 为一个含 36 个光伏电池的光伏组件。如果每个电池额定电压为 1.5V，则组件额定电压为 54V。

如图 5-12 所示，一些光伏组件串联可形成组件串，一些组件串并联即得到一个方阵。可以预见有两种常用的光伏系统设计。图 5-13 为含一个中央逆变器的光伏设计图。图 5-14 为含多个逆变器的光伏系统设计图。

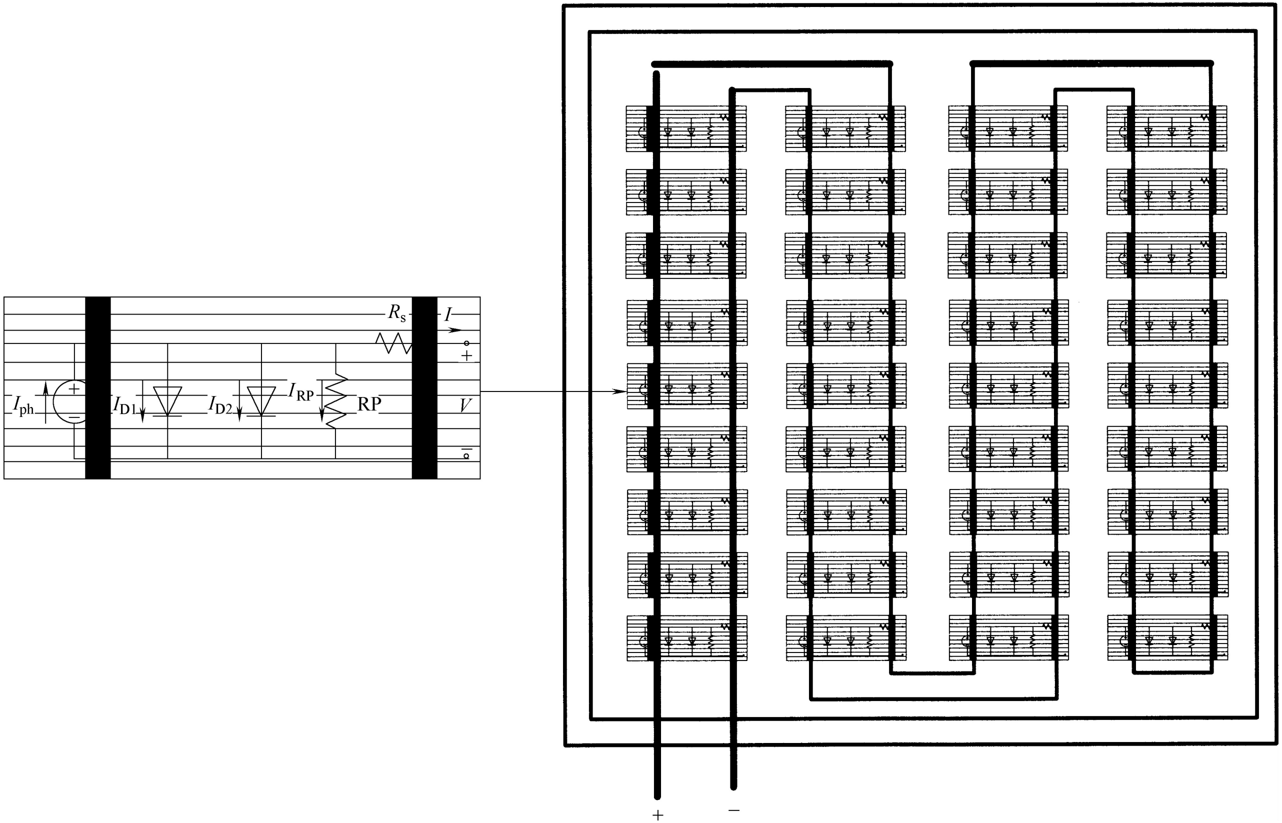


图 5-11　一个含 36 个光伏电池的光伏组件

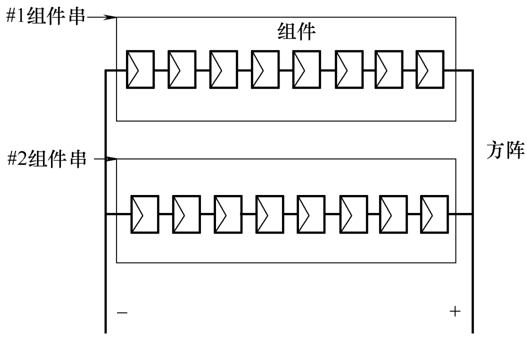


图 5-12 组件、组件串和方阵的基本结构

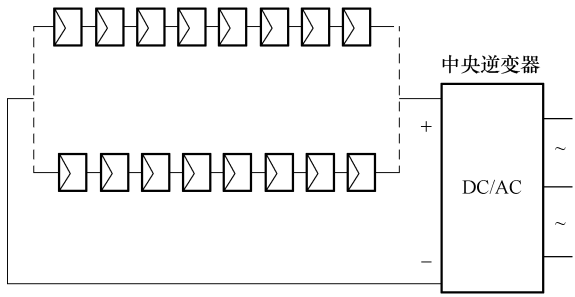


图 5-13 大规模光伏电站中央逆变器结构

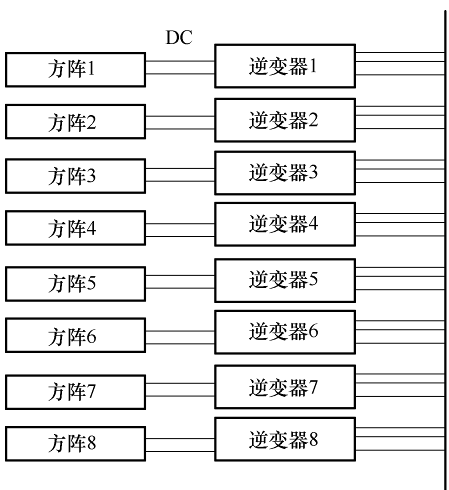


图 5-14 含多个逆变器的光伏方阵常用结构

通常，为了发出更高的直流电压，组件可串联连接。为了发出更高的电流，组件可并联连接。

$$V(\text{串联}) = \sum_{j=1}^{n} V_j;\ n\text{：串联组件数} \tag{5-5}$$

对于并联组件，

$$I(\text{串联}) = \sum_{j=1}^{m} I_j;\ m\text{：并联组件数} \tag{5-6}$$

在一个含多个方阵的光伏系统中，所有方阵的光照情况必须相同；应合理设计放置光伏系统中的组件，以防止某些组件被遮挡。否则，电压不相等将导致一些组件串内电流不相等，因而产生循环电流，导致内部发热，造成效率降低。通常在组件之间使用旁路二极管以避免损坏。如图 5-15 所示，大部分新组件都带有旁路二极管来提高寿命。然而，如果光伏板内的二极管损坏了的话，是很难更换的。

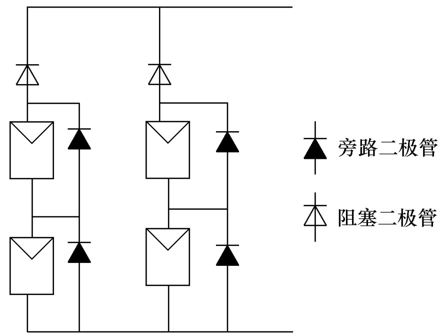


图 5-15　光伏方阵中的旁路二极管和阻塞二极管

光伏产业、国际试验材料学会（ASTM）[8] 和美国能源局已经建立了陆地太阳光谱辐照度分布标准。一个区域的辐照度用被称作日照强度计的仪器测量[9]。图 5-16 表示了辐照度（W/m^2）和波长（nm）之间的关系。

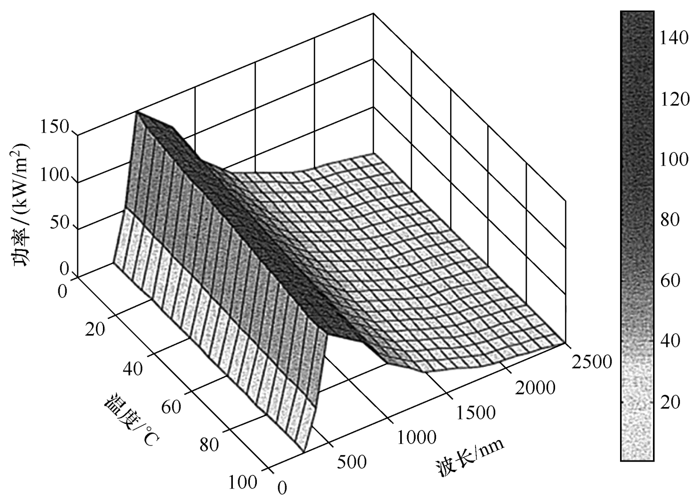


图 5-16　光伏性能评估中的光谱特性[12,15]

太阳光谱是一个特定地区在给定温度和空气流量下从太阳接受到的辐照度。辐射强度［$W/(m^2 \cdot nm)$］被画成波长（nm）的函数。光伏组件将辐照能量转换为电能。光伏组件生产的电能和组件面积成正比。光伏组件辐射强度［$kW/(m^2 \cdot nm)$］被画成太阳光谱的波长和估算温度的函数。图 5-16 中各曲线是在大气质量为 1.5 条件下绘制的。

光伏组件是在标称温度（Nominal Temperature，NT）下测试的。如下式所示，*NT* 可被用来根据环境温度估算电池温度。

$$T_c = T_a + \left(\frac{NT - 20}{Kc}\right) \cdot S \tag{5-7}$$

式中，电池温度 T_c 和环境温度 T_a 的单位为℃；标称运行温度 *NT* 指的是由厂家测试的电池温度；*S* 为太阳辐照度（kW/m^2）；*Kc* 是根据测试数据计算得到的经验常数，范围在 0.7～0.8 之间。

5.7 光伏系统设计

工程系统设计是基于试错法得到的。然而，设计必须表明对提出设计背后的科学和工程方法有清楚的理解。这种情况下，“试错法”是对最终设计的微调。然而，所有工程系统必须遵循基础物理过程。

具体来说，如果设计一个光伏发电系统，就需要使用某种性能的光伏组件。然而，在设计即将投入的光伏系统的整体目标中，某些光伏组件可能符合这些目标，而另外有些可能不符合。因此，需要根据设计规范来测试可用的光伏组件。

对于光伏发电系统，第一个设计规范就是想要产出的功率需求，单位为 kW 或 MW。如果光伏系统准备作为独立电站运行，那么也需要规定额定电压。例如，对于一个住宅光伏系统，可能需要安装几千瓦容量来为住宅负荷供电，额定电压为 120V 或者 207.8V。如果住宅光伏系统接入当地电网，那么设计这个系统时必须规定连接点的电压。对于特定设计还需要考虑其他一些限制因素。下面仍然考虑设计住宅系统的情况。光伏组件会产生直流电压和直流功率。某些地区的电力规程规定了住宅系统中的安全直流电压。原则上希望住宅光伏系统的直流电压稍低，而商业和工业中光伏系统的直流电压稍高。住宅系统要考虑的另一个设计因素可能是光伏系统的重量和占地面积。最后，光伏设计者通常希望设计的满足现场约束的光伏系统安装和运行成本最低。

表 5-4 是本章讨论中用来介绍光伏系统设计使用的一些术语。

所有光伏电站设计都通过连接光伏组件来产生需要的功率（光伏组件和光伏板这两个叫法使用时可以互换）。一个光伏组件额定功率有限；因此，为了设计更高的额定功率，可用串联一些组件的方法得到一个组件串。

$$SV = NM \cdot V_{OC} \tag{5-8}$$

式中，*SV* 为组件串电压，V_{OC} 指的是单个组件的开路电压。

例如，如果组件数量为 5 个，组件开路电压为 50V，那么：

$$SV = 5 \times 50V = 250V\ (DC)$$

对于住宅光伏系统，这个电压值可能比较高。可以把光伏电池、光伏组件和光伏方阵看作是充电电容器。光伏系统充电量随着太阳辐照度变化。阳光充足时，光

表 5-4　光伏设计术语

术　　语	缩　　写	说　　明
组件串电压	SV	串联组件的串电压
组件功率	PM	组件产生的功率
组件串功率	SP	一串组件可发出的功率
组件串数量	NS	一个方阵的组件串数
方阵数量	NA	一个设计的方阵数量
组件表面积	SM	一个组件的表面积
总表面积	TS	总的表面积
方阵功率	AP	通过组件串并联，方阵可发出的功率
组件数量	NM	每个组件串的组件数
组件总数	TNM	把全部方阵合到一起的组件总数
最大功率点跟踪的方阵电压	V_{AMPP}	方阵最大功率点跟踪的运行电压
最大功率点跟踪的方阵电流	I_{AMPP}	方阵最大功率点跟踪的运行电流
方阵最大功率点	P_{AMPP}	方阵的最大运行功率
变换器数量	NC	DC/DC 变换器总数
整流器数量	NR	AC/DC 整流器总数
逆变器数量	NI	DC/AC 逆变器总数

伏系统存储电量最高，可产生最高开路电压。一般来说，住宅光伏系统光伏板的开路电压可设置为低于 DC250V。额定开路电压由当地电力规程规定。一般来说，目前商业和工业光伏系统组件串额定开路电压低于 DC600V。然而，功率更高的光伏电站需要考虑在设计上使用更高的直流电压。

组件串功率 SP 指的是一串组件产生的功率。

$$SP = NM \cdot PM \tag{5-9}$$

式中，NM 是组件个数；PM 是单个组件功率。

例如，如果设计使用 4 个光伏组件，每个组件额定功率为 50W，则该组件串发出的总功率为

$$SP = 4 \times 50\text{W} = 200\text{W}$$

如之前讨论过的，为了提高光伏电站的输出功率，可以提高组件串的电压。另外，也可以并联一些组件串形成一个方阵。因此，方阵输出功率 AP 等于组件串数量乘以组件串的输出功率。

$$AP = NS \times SP \tag{5-10}$$

如果组件串数量为 10，每个组件串输出功率为 200W，则

$$AP = 10 \times 200\mathrm{W} = 2000\mathrm{W}$$

光伏方阵输出直流功率随着太阳位置和方阵接收到的辐射能量变化。方阵可以安装在屋顶或独立安装。通过变换器，光伏方阵可从太阳辐照度能量中获取最大功率。由于以低压通过电缆传输直流功率损耗较高，方阵功率可使用 DC/AC 逆变器转换为交流功率，某些系统中，方阵功率先转换为更高直流电压功率，以获得更高的交流电压和额定功率。

为使方阵输出功率最高，可使用最大功率点（Maximum Power Point，MPP）跟踪法。最大功率点跟踪法在方阵输出功率曲线上找到方阵输出功率最大的点，使方阵电压和电流都位于最大功率点处。

方阵最大功率点 MPP 定义为

$$P_{\mathrm{MPP}} = V_{\mathrm{AMPP}} \cdot I_{\mathrm{AMPP}} \tag{5-11}$$

式中，V_{AMPP}和 I_{AMPP}为方阵最大功率点处的电压和电流。

方阵与逆变器或升压变换器连接，变换器控制系统使方阵运行在最大功率点处。

光伏系统设计的最终目的是使光伏电站运行于最大功率点。然而，必须记住，变换器控制系统是根据方阵电压和电流来定位最大功率运行点的，因此，当日间太阳位置发生变化时，可调节方阵接收到的变化辐照能量。

通过控制逆变器调制比，可控制逆变器输出电压。为了从逆变器获得最大功率，调制比 M_a 应设在最大值，以免产生不必要的谐波。M_a 数值低于 1，一般在 0.95 可获得最高交流输出电压。

例 5.1　设计一个光伏方阵，功率为 10kW，频率为 60Hz，单相交流电压为 230V。求出以下数据：

1）组件串中组件数量以及方阵的组件串数量。

2）逆变器参数和单线图。

光伏组件参数见表 5-5。

表 5-5　典型光伏组件电压和电流特性

最大功率 P_{MPP}	300W
最大功率点（MPP）电压 V_{MPP}	50.6V
最大功率点（MPP）电流 I_{MPP}	5.9A
V_{OC}（开路电压）	63.2V
I_{SC}（短路电流）	6.5A

解

负荷侧电压设定为单相交流 230V。为从光伏方阵获得最大功率，选择调制比

为 $M_a=0.9$。逆变器输入电压为

$$V_{idc}=\frac{\sqrt{2}V_{ac}}{M_a}$$

$$V_{idc}=\frac{\sqrt{2}\times 230}{0.9}V=361.4V \tag{5-12}$$

逆变器需控制光伏方阵运行在最大功率点。因此，一个组件串的串联组件数为

$$NM=\frac{V_{idc}}{V_{MPP}} \tag{5-13}$$

式中，V_{MPP}为光伏组件的最大功率点电压。

$$NM=\frac{361.4}{50.6}\approx 7$$

组件串电压为

$$SV=NM\cdot V_{MPP} \tag{5-14}$$

如果使用这个组件，则组件串电压（见表 5-5）为

$$SV=7\times 50.6V=354.2V$$

1）单个组件串输出功率为

$$SP=NM\cdot P_{MPP}$$

式中，P_{MPP}为组件在最大功率点输出的标称功率。

单个组件串输出功率为

$$P_{string}=7\times 300W=2100W$$

为计算 10kW 光伏系统的组件串数量，将光伏电站额定功率除以每个组件串的额定功率：

$$NS=\frac{AP}{SP} \tag{5-15}$$

式中，NS 为组件串数量，AP 和 SP 分别为方阵和组件串的额定功率。因此本例中组件串数为

$$NS=\frac{10\times 10^3}{2100}\approx 5$$

因此，方阵中含 5 个组件串即可发出 10kW 功率。10kW 光伏电站参数见表 5-6。

表 5-6　10kW 光伏电站参数

每个组件串的组件数	每个方阵的组件串数	方　阵　数	组件串电压/V
7	5	1	354.2

2）最终设计中，逆变器应可以传输 10kW 功率，且交流电压为 230V。根据表 5-5 中光伏组件的参数，组件串电压为

$$V_{idc} = 354.2\text{V}$$

则调制比为

$$M_a = \frac{\sqrt{2}V_{ac}}{V_{idc}}$$

$$M_a = \frac{\sqrt{2} \times 230}{354.2} = 0.92$$

假设切换频率为 6kHz。因此，调频指数为

$$M_f = \frac{f_S}{f_e} = \frac{6000}{60} = 100$$

光伏系统电气接线如图 5-17 所示。逆变器参数见表 5-7。

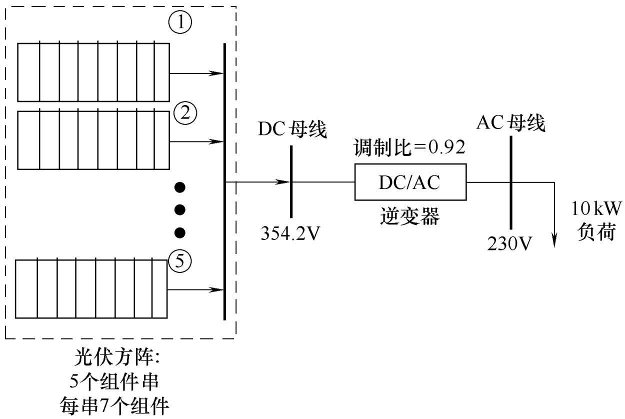


图 5-17　例 5.1 的电气接线图

表 5-7　逆变器参数

输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
354.2	10	230	0.92	100

例 5.2　设计一个光伏系统，额定功率为 500kW，频率为 60Hz，三相交流电压为 460V，使用例 5.1 中的光伏组件参数。求以下数据：

1）一个组件串的组件数量，以及方阵的组件串数量。

2）逆变器和升压变换器参数。

3）输出电压和总谐波畸变。

4）系统电气主接线图。

解

额定功率为 500kW，交流电压为 460V。根据电压和调制比 0.9，可以求出三相逆变器的输入直流电压：

$$V_{\mathrm{idc}}=\frac{2\sqrt{2}V_{\mathrm{LL}}}{\sqrt{3}M_{\mathrm{a}}}$$

$$=\frac{2\sqrt{2}\times 460}{\sqrt{3}\times 0.9}\mathrm{V}=835\mathrm{V} \tag{5-16}$$

由于组件串最大电压限制在 600V。因此，可以使用升压变换器将组件串电压升至 835V。

如果选择的组件串电压为 550V，则

1）一个组件串中组件数为

$$\frac{V_{\mathrm{string}}}{V_{\mathrm{MPP}}}=\frac{550}{50.6}\approx 11$$

式中，V_{MPP}为组件的最大功率点电压。

组件串功率 SP 为

$$SP=NM\cdot P_{\mathrm{MPP}}$$

组件额定功率为 300W，则

$$SP=11\times 300\mathrm{W}=3300\mathrm{W}$$

组件串电压为

$$SV=NM\cdot V_{\mathrm{MPP}}$$

因此，本设计的组件串电压 SV 为

$$SV=11\times 50.6\mathrm{V}=556.6\mathrm{V}$$

如果每个方阵输出功率为 20kW，则每个方阵中组件串数量 NS 为

$$NS=\frac{\text{一个方阵的功率}}{\text{一个组件串的功率}}$$

$$NS=\frac{20}{3.3}=6$$

电站的光伏方阵数量 NA 为

$$NA=\frac{\text{光伏输出功率}}{\text{一个方阵的功率}} \tag{5-17}$$

因此，$NA=\frac{500\mathrm{kW}}{20\mathrm{kW}}=25$

光伏系统参数见表 5-8。

表 5-8　光伏系统参数

每个组件串的组件数	每个方阵的组件串数	方　阵　数	组件串电压/V
11	6	25	556.6

2）逆变器应能承受升压变换器的输出电压，且可以传输需要的功率。选定的逆变器额定功率为 100kW，输入直流电压为 835V，调制比为 0.9。逆变器输出交

流电压为 460V。

需要传输 500kW 功率需要的逆变器数量为

$$NI = \frac{\text{光伏输出功率}}{\text{一个逆变器的功率}} \tag{5-18}$$

因此，$NI = \frac{500\text{kW}}{100\text{kW}} = 5$

因此，为向负荷提供 500kW 功率需要并联 5 个逆变器，假设逆变器切换频率为 5.04kHz。

因此，调频指数 M_f 为

$$M_f = \frac{f_S}{f_e} = \frac{5040}{60} = 84$$

升压变换器数量等于方阵数量，为 25，每个升压变换器额定功率为 20kW。

升压变换器输入电压和组件串电压相等：

$$V_i = 556.6\text{V}$$

升压变换器输出电压和逆变器输入电压相等：

$$V_{idc} = V_o = 835\text{V}$$

升压变换器占空比为

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{556.6}{835} = 0.33$$

逆变器和升压变换器参数分别见表 5-9 和表 5-10。

表 5-9　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
5	835	100	460	0.90	84

表 5-10　500kW 容量升压变换器参数

升压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
25	556.6	20	835	0.33

3）逆变器调频指数为 84，使用快速傅里叶变换的仿真平台可算出输出电压的谐波分量，见表 5-11。

表 5-11　相电压谐波分量

3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	9 次谐波
0.01%	0.02%	0	0.03%

输出相电压和时间的关系为

$$V_{ac}=\frac{460\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\sin(2\pi60\cdot t)+\frac{0.01}{100}\times\frac{460\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\sin(2\pi\times3\times60\cdot t)$$

$$+\frac{0.02}{100}\times\frac{460\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\sin(2\pi\times5\times60\cdot t)+\frac{0}{100}\times\frac{460\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\sin(2\pi\times7\times60\cdot t)$$

$$+\frac{0.03}{100}\times\frac{460\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot\sin(2\pi\times9\times60\cdot t)$$

$$=376\sin(2\pi60\cdot t)+0.037\sin(6\pi60\cdot t)+0.075\sin(10\pi60\cdot t)$$

$$+0.113\sin(18\pi60\cdot t)$$

总谐波含量为

$$THD=\sqrt{\sum(\text{谐波百分数})^2}=\sqrt{0.01^2+0.02^2+0^2+0.03^2}=0.04\%$$

4）电气接线图如图 5-18 所示。

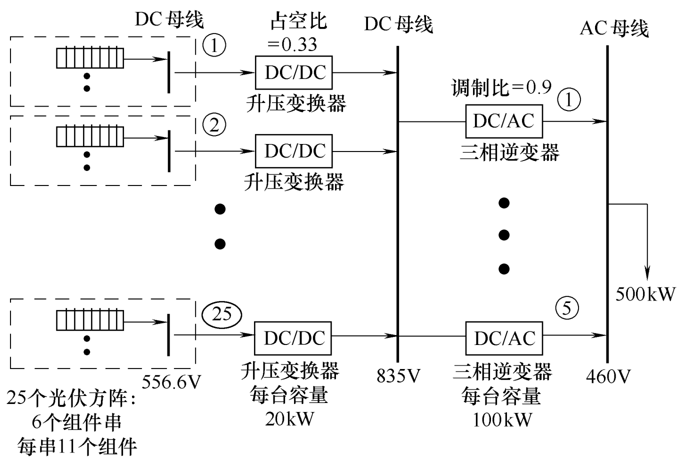


图 5-18　例 5.2 电气接线图

例 5.3　设计一个光伏系统，额定功率为 1000kW，频率为 60Hz，三相交流电压为 460V，组件参数见表 5-12。求出以下数据：

表 5-12　例 5.3 中光伏组件参数

组　　件	第 1 类
最大功率/W	190
最大功率点电压/V	54.8
最大功率点电流/A	3.47
V_{OC}（开路电压）/V	67.5
I_{SC}（短路电流）/A	3.75

（续）

组　　件	第 1 类
效率（%）	16.40
成本/美元	870.00
宽度/in	34.6
长度/in	51.9
厚度/in	1.8
重量/lb	33.07

1）组件串中组件数量，方阵中组件串数量，方阵数量，系统光伏板表面积、重量和成本。

2）逆变器和升压变换器参数以及系统电气接线图。

解

系统额定功率为 1000kW，交流电压为 460V。根据电压和调制比 0.85，三相逆变器的直流电压为

$$V_{\mathrm{idc}}=\frac{2\sqrt{2}V_{\mathrm{LL}}}{\sqrt{3}M_{\mathrm{a}}}=\frac{2\sqrt{2}\times 460}{\sqrt{3}\times 0.85}\mathrm{V}=884\mathrm{V}$$

组件串输出电压最大值定为 600V。因此，需要一台升压变换器将电压提升至 884V。

1）如果选择的组件串电压为 550V，那么每个组件串的组件数量为

$$NM=\frac{V_{\mathrm{string}}}{V_{\mathrm{MPP}}}=\frac{550}{54.8}\approx 10$$

式中，V_{MPP}是光伏组件的最大功率点电压。

$$SP=NM\cdot P_{\mathrm{MPP}}$$

式中，P_{MPP}为光伏组件最大输出功率。

$$SP=10\times 190\mathrm{W}=1900\mathrm{W}$$

组件串电压 SV 为

$$SV=NM\cdot V_{\mathrm{MPP}}$$

因此，本例中组件串电压 SV 为

$$SV=10\times 54.8\mathrm{V}=548\mathrm{V}$$

如果每个方阵容量为 20kW，则一个方阵的组件串数量 NS 为

$$NS=\frac{AP}{SP}$$

$$NS=\frac{20}{1.9}=11$$

本例中方阵数量为

$$NA=\frac{\text{光伏系统额定容量}}{\text{一个方阵的额定容量}}$$

$$NA=\frac{1000}{20}=50$$

系统的光伏组件总数量由组件串中组件数量、方阵组件串数量和系统方阵数量相乘得到：

$$TNM=NM\cdot NS\cdot NS$$

$$TNM=10\times 11\times 50=5500 \tag{5-19}$$

单个组件表面积 SM 由其长度和宽度相乘得到：

$$SM=\frac{34.6\times 51.9}{144}\text{ft}^2=12.5\text{ft}^2$$

因此，系统总面积 TS 可由组件数量以及每个组件面积相乘得到：

$$TS=5500\times 12.5\text{ft}^2=68750\text{ft}^2=\frac{68750}{43560}\text{acre}=1.57\text{acre}^{㊀}$$

系统成本为组件数量和单个组件成本的乘积：

$$\text{总成本}=5500\times 870\text{ 美元}=4.78\times 10^6\text{ 美元}$$

系统总重量为组件数量和单个组件重量的乘积：

$$\text{总重量}=5500\times 33.07\text{lb}=181885\text{lb}$$

2）逆变器应能承受升压变换器的输出电压，且能传输需要的功率。如果选择的逆变器额定容量为 250kW，则逆变器数量 NI 为

$$NI=\frac{\text{光伏系统容量}}{\text{单个逆变器容量}}$$

$$NI=\frac{1000}{250}=4$$

因此，需要并联 4 个逆变器以传输 1000kW 功率。

假设逆变器开关频率为 5.4kHz，则调频指数为

$$M_f=\frac{f_S}{f_e}=\frac{5400}{60}=90$$

升压变换器数量等于方阵数量，为 50。选择额定容量为 20kW 的升压变换器，其输入电压等于组件串电压：

$$V_i=548\text{V}$$

升压变换器输出电压等于逆变器输入电压：

$$V_{idc}=V_o=884\text{V}$$

升压变换器占空比为

㊀ 译者注：acre（英亩）为英制面积单位，1acre = 4046.86m² = 43560ft²。

$$D=1-\frac{V_i}{V_o}$$

$$D=1-\frac{548}{884}=0.38$$

系统电气接线图如图 5-19 所示。1000kW 光伏系统参数见表 5-13，逆变器参数见表 5-14，升压变换器参数见表 5-15。

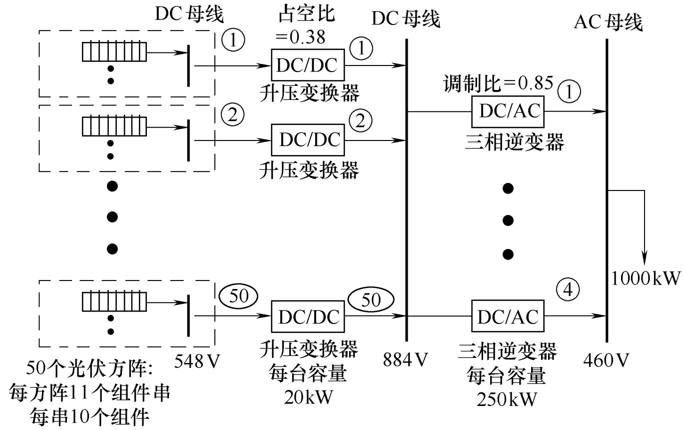


图 5-19　例 5.3 电气接线图

表 5-13　1000kW 光伏系统参数

每串组件数	每方阵串数	方阵数	串电压/V	总面积/ft^2	总重量/lb	总成本/百万美元
10	11	50	548	68750	181885	4. 78

表 5-14　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
4	884	250	460	0. 85	90

表 5-15　升压变换器参数

升压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
50	548	20	884	0. 38

5.8　光伏组件建模

正如之前讨论过的，一个商业光伏组件由多个光伏电池组成。光伏电池由一个 p-n 同质结材料形成。当 p 型掺杂半导体和 n 型掺杂半导体结合时，就形成了 p-n

结。如果 p 型和 n 型半导体的能带隙相等，那么就形成一个同质结。同质结是半导体接触面，发生在相似半导体材料层间。这类半导体带隙相同，且通常含不同掺杂质。p-n 同质结吸收辐射能量将产生直流功率。

图 5-20 为光伏电池模型。当组件吸收太阳辐照能量时，就进行充电。光伏电池的模型类似于二极管模型，可以用著名的 Shorkley-Read 公式表示。

如图 5-21 所示，光伏组件可用一个单指数模型表示。输出电流和电压、光生电流、温度之间的关系如式（5-20）所示。

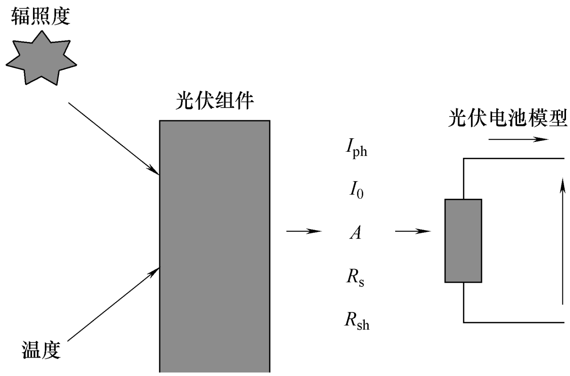


图 5-20　光伏组件模型

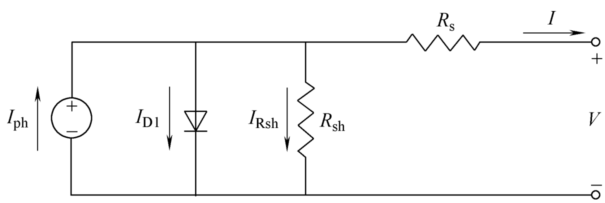


图 5-21　光伏组件单指数模型

在图 5-21 所示模型中，光伏组件由电流源 I_{ph} 和电阻 R_{sh} 并联表示。流过电阻的电流用 I_{Rsh} 表示。输出电压 V 和内阻 R_s 串联。图 5-21 中光伏组件模型也通过二极管流过的电流 I_{D1} 描述功率损耗。单指数模型如式（5-20）所示。

$$I = I_{ph} - I_0\left\{\exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{n_c AkT}\right] - 1\right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{5-20}$$

式中，A 表示二极管品质因子；n_c 为组件中电池数量；k 为波尔兹曼常数，$k = 1.38\times10^{-23}$J/K；q 为电子电荷，$q = 1.6\times10^{-19}$C；T 为热力学温度（K）。

式（5-20）为非线性公式，参数 I_{ph}、I_0、R_s、R_{sh} 以及 A 与温度、辐照度以及制造公差有关。通过制造商提供的测试数据，可以使用数值分析法和曲线拟合法来估算每个参数值。估算光伏方阵模型很复杂。本章最后将介绍解决这个问题的方法。

5.9 光伏性能测试

一个位于最大且恒定辐照水平下的光伏组件可发出功率为 1000W/m^2。1000W/m^2 也称作一个日照强度。光伏组件的输出功率可根据太阳照射度调整。表 5-16 说明了辐照度（单位为 W/m^2）和日照性能的关系。

表 5-16 日照性能和辐照度关系

日 照 性 能	入射辐照度
1 日照强度	1000W/m^2
0.8 日照强度	800W/m^2
0.6 日照强度	600W/m^2
0.4 日照强度	400W/m^2
0.2 日照强度	200W/m^2

光伏方阵系统的太阳辐照能量可根据入射角调整。这些数据用来使光伏方阵运行在其最大功率点处。下一节将讨论大功率变换器如何利用数字控制器使光伏电站运行在最大功率点。

5.10 光伏方阵的最大功率点

首先，让我们回顾一个阻性电路的最大传输功率。考虑图 5-23 的电路，假设一个输入电阻为 R_{in}的电压源与负荷电阻 R_L 连接。

供给负荷的电流为

$$I = \frac{V}{R_{in} + R_L} \tag{5-21}$$

流向负荷的功率为

$$P = I^2 R_L \tag{5-22}$$

$$P = V^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2} \tag{5-23}$$

对 R_L 微分，得

$$\frac{dP}{dR_L} = V^2 \frac{(R_{in} + R_L)^2 \dfrac{dR_L}{dR_L} - R_L \dfrac{d(R_{in} + R_L)^2}{dR_L}}{(R_{in} + R_L)^4}$$

$$\frac{dP}{dR_L} = V^2 \frac{R_{in} - R_L}{(R_{in} + R_L)^3} \tag{5-24}$$

令上式等于零，可得到最大功率运行点。当 $R_L = R_{in}$时，流向负荷的功率为最

大功率。

光伏组件输出功率随太阳辐照度变化。图 5-22 描述了不同辐照度下输出功率和组件电流、电压之间的关系。

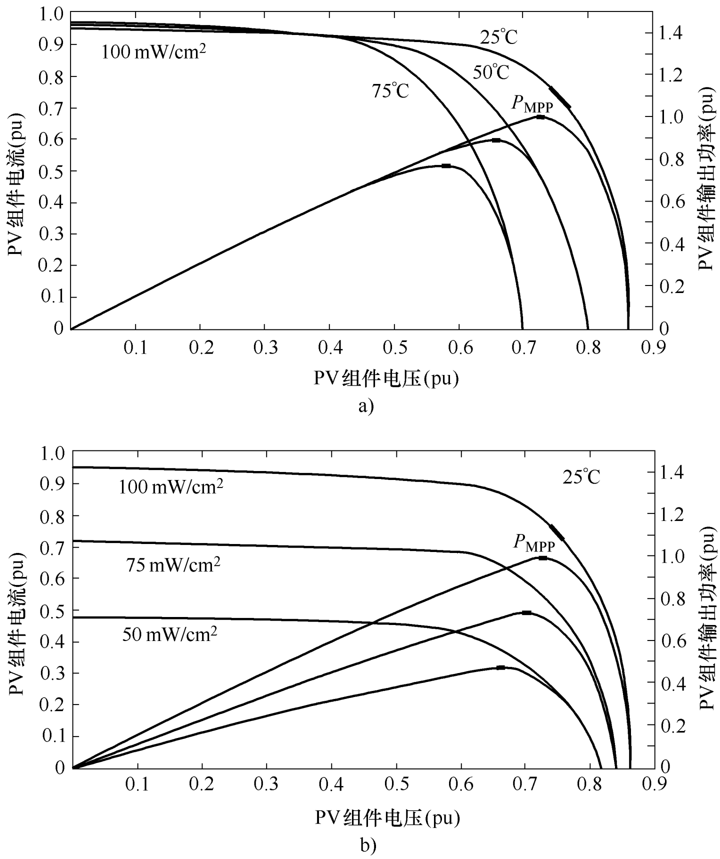


图　5-22[10]

a）温度变化时光伏组件输出电流、电压和功率的关系

b）辐照度变化时光伏组件输出功率、电压和电流的关系

在太阳位置、云量和每日温度等环境条件发生变化时，光伏系统应能运行在方阵最大功率点处。图 5-21 的光伏方阵等效电路模型向负荷 R_L 传输功率的模式可用图 5-24 表示。

图 5-24 用带并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s 的电流源表述光伏电源的电路模型[20]。并联电阻值较大，而串联电阻值很小。R_L 为负荷电阻。图 5-24 中，R_L 是等效负荷，因为实际上，如果

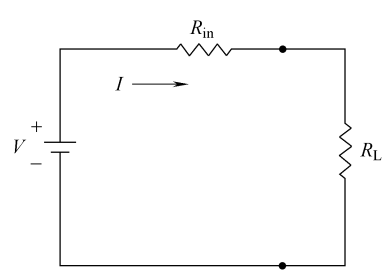


图 5-23　带电阻负荷的直流源

光伏电站独立运行，负荷是接在逆变器侧的。光伏电站与电网连接时，负荷为流向电网的功率。图 5-25 为电流源模型对应的等效电压源电路模型。

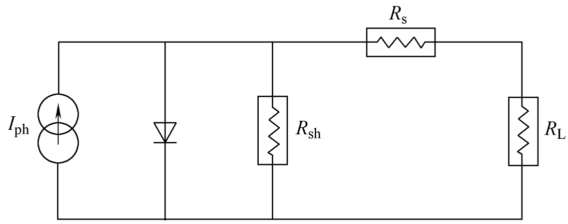


图 5-24　光伏模型和负荷

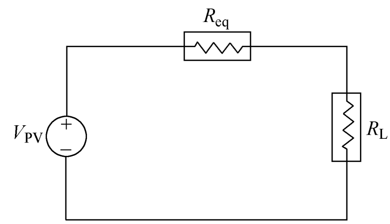


图 5-25　光伏方阵简化电压源等效电路模型

从图 5-22 可以看出，光伏组件特性是高度非线性的。光伏方阵输入阻抗受辐照度变化和温度影响。图 5-22 也标出了相应的输出功率。

图 5-26 为光伏能量管理系统，其中，升压变换器可提高电压，逆变器将直流功率转换为交流功率。为从光伏方阵获得最大功率，光伏电站输入阻抗必须与负荷匹配。MPPT 控制策略就是力求升压变换器运行在光伏方阵电流-电压特性曲线上可以获得最大输出功率的一点。对于光伏电站，控制策略计算 $dP/dV>0$ 和 $dP/dV<0$ 的点，并判断是否获得最大功率。图 5-27 为控制算法图。如果光伏方阵给直流负荷供电，就不需要 DC/AC 逆变器。

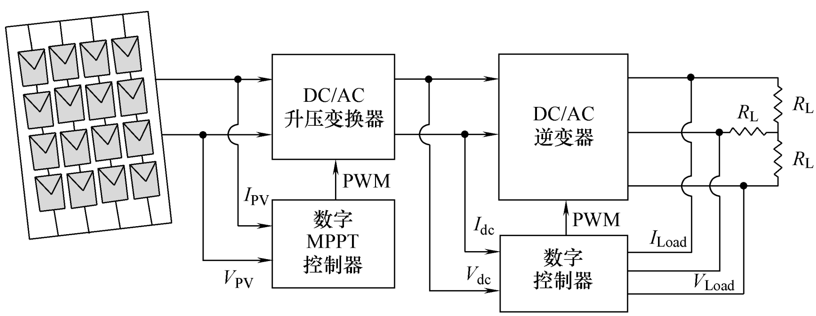


图 5-26　使用设定电压的升压变换器和逆变器的光伏能量管理系统

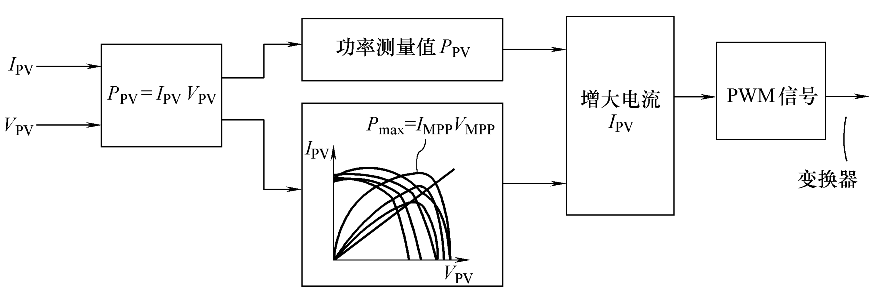


图 5-27　最大功率点跟踪控制算法

根据应用情况，可提出一些不同的光伏系统设计。光伏系统用于给蓄电池储能系统充电时，可使用图 5-28 和图 5-29 的设计方案，分别使用升压变换器和降压变换器。在这个设计中，MPPT 可使用图 5-27 的 MPPT 控制算法实现。

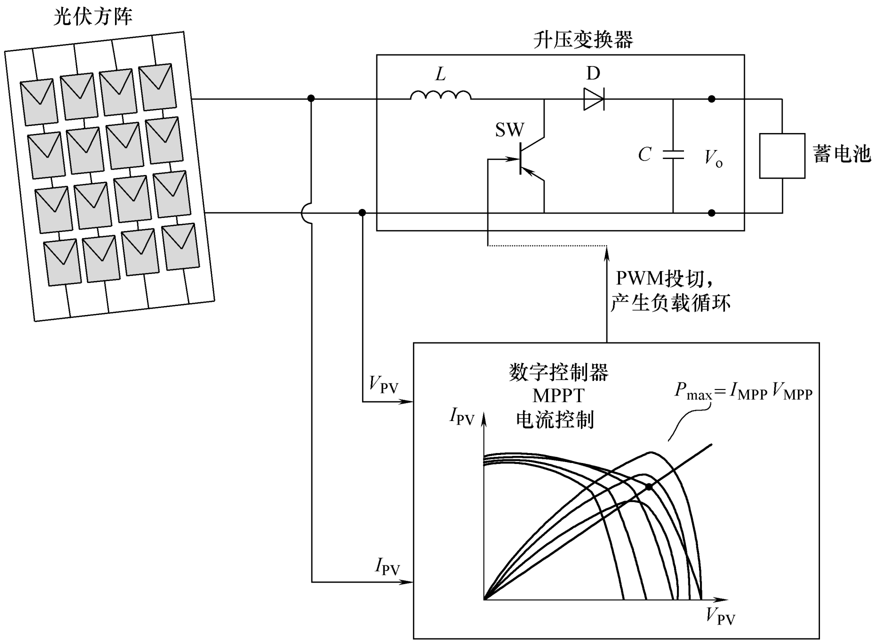


图 5-28　只使用一个升压变换器的最大功率跟踪控制

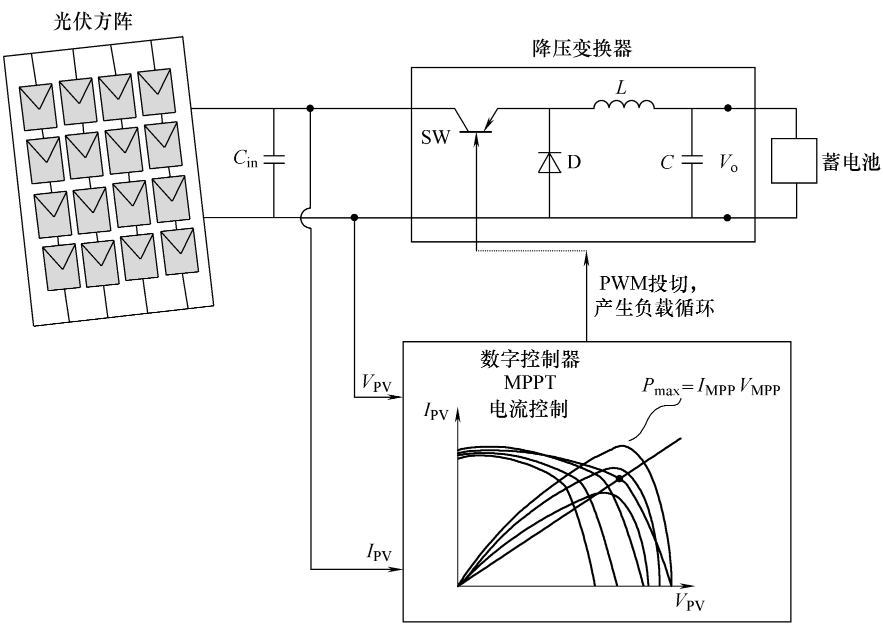


图 5-29　使用降压变换器的最大功率跟踪控制

如果光伏电站是联网的，可使用图 5-30 的带逆变器光伏系统和 MPPT 设计方案。同样，根据图 5-27 的控制算法，数字控制器可跟踪光伏电站的输出电压和电流，并计算最大功率点。控制算法通过 PWM 开关策略来控制逆变器电流，使光伏电站运行于最大功率点。然而，控制算法得到的结果不是总谐波畸变最低点。图 5-27 提出的设计有两个控制回路。第一个回路控制 DC/DC 变换器，第二个回路可控制总谐波畸变率和输出电压。

图 5-30 中，MMPT 控制是逆变器功能的一部分，MMPT 跟踪可能不是最优的。在这种 MPPT 控制中，电流流过组件串的所有组件。然而，由于 I-V 曲线可能不同，有些组件串可能没有运行在其最大功率点。因此，最终捕获的能量可能不是最高的，且系统中有能量损耗。

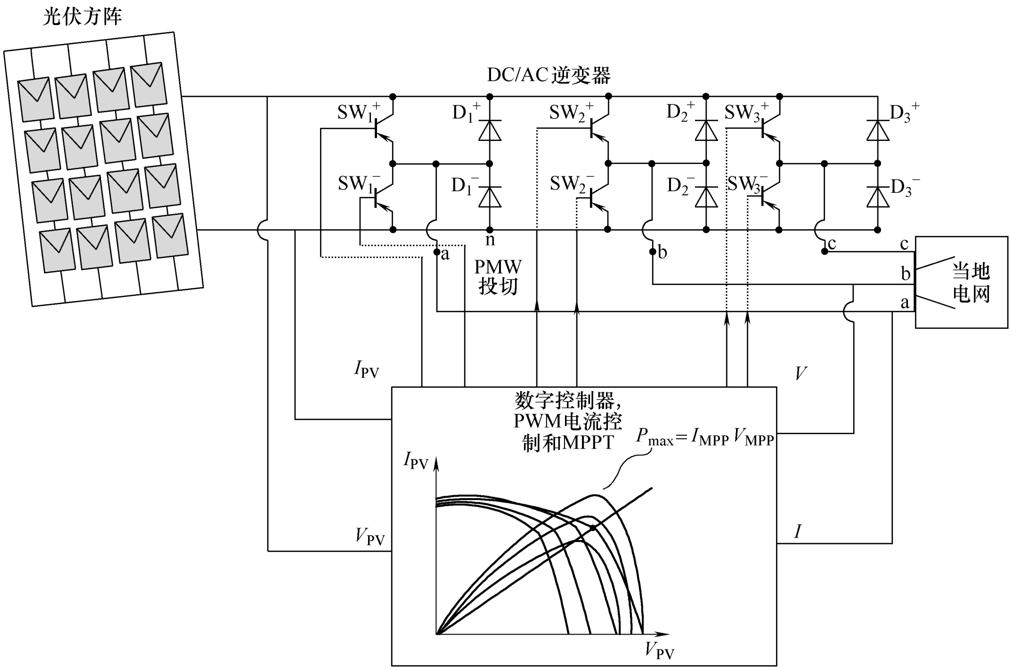


图 5-30　联网光伏电站最大功率跟踪控制

图 5-31 为一个联网的带蓄电池储能系统的光伏电站。DC/DC 变换器和它的 MPPT 被称为充电控制器。充电控制器具备很多功能。一些充电控制器用于检测光伏方阵电流-电压特性的变化。为使光伏系统运行在接近最大功率点电压并获取最大功率，必须使用 MPPT 控制器，如图 5-27 所示。充电控制器也能进行蓄电池能量管理。在正常运行下，控制器控制蓄电池电压，蓄电池电压在允许的最大值和最小值之间变化。当蓄电池电压达到临界值时，充电控制器将为蓄电池充电并保护蓄电池避免过充。这种控制通过两个不同的电压阈值实现，即蓄电池电压和光伏组件电压。

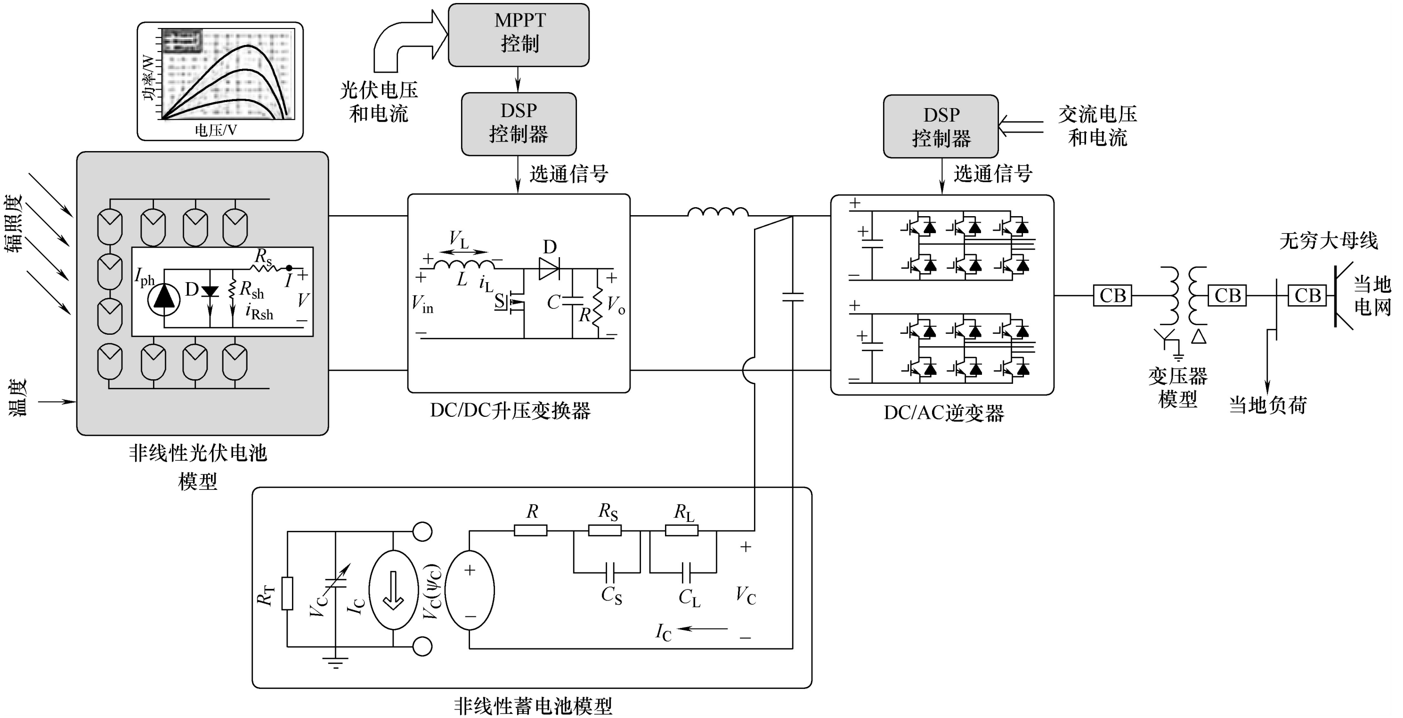


图 5-31　接入当地电网且带蓄电池系统、运行在最大功率点的光伏电站

在较低电压处，典型值为 11.5V，控制器断开负荷，并给蓄电池储能系统充电。在较高电压处，对于12V 蓄电池储能系统通常为 12.5V，控制器将负荷连接至蓄电池侧。控制算法根据蓄电池储能系统调整这两个电压阈值。

在当地储能系统应用中，DC/DC MPPT 光伏充电控制器促进了光伏系统接入的标准化。图 5-31 中的系统也可以用作独立微电网，为不间断电源（UPS）提供优质功率。

例 5.4　设计一个光伏微电网系统，额定功率为 50kW，频率为 60Hz，电压为单相交流 220V，使用一个升压变换器和一个单相 DC/AC 逆变器。在设计中使用表 5-17 的数据。

表 5-17　典型光伏组件参数

组　　件	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
最大功率/W	190	200	170	87
最大功率点（MPP）电压/V	54.8	26.3	28.7	17.4
MPP 电流/A	3.47	7.6	5.93	5.02
V_{OC}（开路电压）/V	67.5	32.9	35.8	21.7
I_{SC}（短路电流）/A	3.75	8.1	6.62	5.34
效率（%）	16.40	13.10	16.80	>16
成本/美元	870.00	695.00	550.00	397.00
宽度/in	34.6	38.6	38.3	25.7
长度/in	51.9	58.5	63.8	39.6
厚度/in	1.8	1.4	1.56	2.3
重量/lb	33.07	39	40.7	18.3

求出以下数据：

1）对于每类光伏组件，计算组件串中组件数量，方阵中组件串数量、方阵数量、表面积、重量和成本。

2）升压变换器和逆变器参数，以及系统电气接线图。

解

负荷额定功率为 50kW，额定电压为交流 220V。根据负荷电压以及调制比 0.9，可以得到逆变器的直流输入电压为

$$V_{idc}=\frac{\sqrt{2}V_{ac}}{M_a}=\frac{\sqrt{2}\times 220}{0.9}\text{V}=345\text{V}$$

1）如果组件串电压 SV 设为 250V，则每个组件串所含组件数量为

$$NM=\frac{组件串电压}{V_{MPP}}$$

式中，V_{MPP}为光伏组件的最大功率点电压。

$$NM=\frac{250}{54.8}\approx 5\quad 类型1$$

$$=\frac{250}{26.3}\approx 10\quad 类型2$$

$$=\frac{250}{28.7}\approx 9\quad 类型3$$

$$=\frac{250}{17.4}\approx 15\quad 类型4$$

组件串电压 SV 为

$$SV=NM\times V_{MPP}$$

因此本设计中组件串电压为

$$SV=5\times 54.8\text{V}=274\text{V}\quad 类型1$$

$$=10\times 26.3\text{V}=263\text{V}\quad 类型2$$

$$=9\times 28.7\text{V}=258.3\text{V}\quad 类型3$$

$$=15\times 17.4\text{V}=261\text{V}\quad 类型4$$

选择表 5-19 中的 15.2kW 升压变换器，则升压变换器数量 NC 为

$$NC=\frac{光伏电站容量}{升压变换器额定功率}$$

$$NC=\frac{50}{15.2}\approx 4$$

因此，本设计应含 4 个光伏方阵，每个方阵配备一个升压变换器。方阵功率 AP 为

$$AP=\frac{光伏电站容量}{方阵数量}$$

$$AP=\frac{50}{4}\text{kW}=12.5\text{kW}$$

组件串功率 SP 为

$$SP=NM\times P_{MPP}$$

式中，P_{MPP}是光伏组件最大功率。

$$SP=5\times 190\text{W}=0.95\text{kW}\quad 类型1$$

$$=10\times 200\text{W}=2\text{kW}\quad 类型2$$

$$=9\times 170\text{W}=1.53\text{kW}\quad 类型3$$

$$=15\times 87\text{W}=1.305\text{kW}\quad 类型4$$

组件串数量 NS 为

$$NS = \frac{单个方阵功率}{单个组件串功率}$$

$$NS = \frac{12.5}{0.95} = 14 \quad 类型 1$$

$$= \frac{12.5}{2} = 7 \quad 类型 2$$

$$= \frac{12.5}{1.53} = 9 \quad 类型 3$$

$$= \frac{12.5}{1.305} = 10 \quad 类型 4$$

组件总数量 TNM 为

$$TNM = NM \times NS \times NA$$

$$TNM = 5 \times 14 \times 4 = 280 \quad 类型 1$$

$$= 10 \times 7 \times 4 = 280 \quad 类型 2$$

$$= 9 \times 9 \times 4 = 324 \quad 类型 3$$

$$= 15 \times 10 \times 4 = 600 \quad 类型 4$$

每类组件需要的表面积 TS 由总的组件数量和每个组件长度、宽度相乘得到：

$$TS = \frac{280 \times 34.6 \times 51.9}{144}\text{ft}^2 = 3492\text{ft}^2 \quad 类型 1$$

$$= \frac{280 \times 38.6 \times 58.5}{144}\text{ft}^2 = 4391\text{ft}^2 \quad 类型 2$$

$$= \frac{324 \times 38.3 \times 63.8}{144}\text{ft}^2 = 5498\text{ft}^2 \quad 类型 3$$

$$= \frac{600 \times 25.7 \times 39.6}{144}\text{ft}^2 = 4241\text{ft}^2 \quad 类型 4$$

每类光伏组件对应的系统总重量为组件数量和每个组件重量的乘积：

$$总重量 = 280 \times 33.07\text{lb} = 9260\text{lb} \quad 类型 1$$

$$= 280 \times 39.00\text{lb} = 10920\text{lb} \quad 类型 2$$

$$= 324 \times 40.70\text{lb} = 13187\text{lb} \quad 类型 3$$

$$= 600 \times 18.40\text{lb} = 11040\text{lb} \quad 类型 4$$

每个光伏组件类型对应的系统总成本为组件数量和每个组件成本的乘积：

$$总重量 = 280 \times 870 美元 = 243600 美元 \quad 类型 1$$

$$= 280 \times 695 美元 = 194600 美元 \quad 类型 2$$

$$= 324 \times 550 美元 = 178200 美元 \quad 类型 3$$

$$= 600 \times 397 美元 = 238200 美元 \quad 类型 4$$

单相逆变器参数见表 5-18，升压变换器典型参数见表 5-19，每类光伏组件对应的光伏系统参数见表 5-20。

表 5-18　单相逆变器参数

逆　变　器	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
功率	500W	5kW	15kW	4.7kW
直流输入电压	500V	500V（max）	500V	500V
交流输出电压	230V（AC）/60Hz @2.17A	230V（AC）/60Hz @27A	220V（AC）/60Hz @68A	230V（AC）/60Hz @17.4A
效率	Min. 78%@满负荷	97.60%	>94%	96%
长度	15.5in	315mm	625mm	550mm
宽度	5in	540mm	340mm	300mm
高度	5.3in	191mm	720mm	130mm
重量	9lb	23lb	170kg	21kg

表 5-19　升压变换器典型参数

输入电压/V	输出电压/V	功率/kW
24～46	26～48	9.2
24～61	26～63	12.2
24～78	26～80	11.23
24～78	26～80	13.1
24～98	26～100	12.5
80～158	82～160	15.2
80～198	82～200	14.2
80～298	82～300	9.5
200～600	700～1000	20.0

表 5-20　每类光伏组件对应的光伏系统参数

PV 类型	每串组件数	每方阵串数	方阵数	组件串电压/V	PV 总面积/ft^2	PV 总重量/lb	PV 总造价/美元
1	5	14	4	274	3492	9260	243600
2	10	7	4	263	4391	10920	194600
3	9	9	4	258.3	5498	13187	178200
4	15	10	4	261	4241	11040	238200

2）升压变换器额定功率为

$$\text{升压变换器额定功率}=\frac{\text{光伏电站容量}}{\text{变换器数量}}$$

$$\text{升压变换器额定功率}=\frac{50}{4}\text{kW}=12.5\text{kW}$$

如表 5-21 所示，选择升压变换器输出电压 $V_{idc}=V_o=345V$，输入电压和组件串电压相等：

类型 1：$V_i=274V$，类型 2：$V_i=263V$，类型 3：$V_i=258.3V$，类型 4：$V_i=261V$

表 5-21　升压变换器参数

PV 类型	升压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
1	4	274	12.5	345	0.205
2	4	263	12.5	345	0.237
3	4	258.3	12.5	345	0.251
4	4	261	12.5	345	0.243

升压变换器占空比为

$$D=1-\frac{V_i}{V_o}$$

$$D=1-\frac{274}{345}=0.205\quad \text{组件类型 1}$$

$$=1-\frac{263}{345}=0.237\quad \text{组件类型 2}$$

$$=1-\frac{258.3}{345}=0.251\quad \text{组件类型 3}$$

$$=1-\frac{261}{345}=0.243\quad \text{组件类型 4}$$

逆变器应能承担升压变换器的输出电压，并能传输需要的功率。假设每个逆变器额定容量为 10kW。

逆变器输入电压 $V_{idc}=345V$，调制比为 0.9。输出电压为交流 220V。

传输 50kW 功率的逆变器数量 NI 为

$$NI=\frac{\text{光伏电站容量}}{\text{单个逆变器容量}}$$

$$NI=\frac{50}{10}=5$$

因此，为了提供 50kW 功率，需要并联 5 个逆变器。当然，也可以使用一个高额定功率的逆变器。因此，也可以使用其他一些设计。

设开关频率为 5.1kHz，则调频指数为

$$M_f=\frac{f_S}{f_e}=\frac{5100}{60}=85$$

逆变器参数见表 5-22。

表 5-22　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
5	345	10	220	0.90	85

读者可自己计算总谐波畸变率。

本例的系统电气接线如图 5-32 所示。

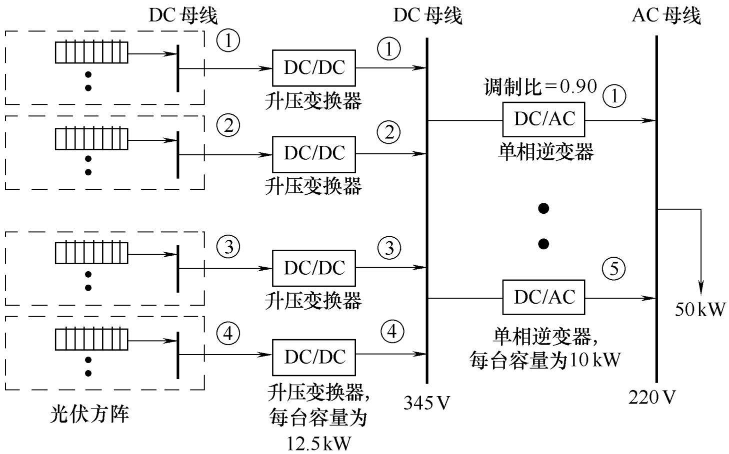


图 5-32　例 5.4 电气接线图

可根据系统的重量和成本来选择光伏系统的类型。对于安装在现有屋顶的家庭和商用光伏系统，通常选择重量最轻的光伏组件。

升压变换器可根据其额定功率和输出电压选择。升压变换器必须满足光伏系统最低输出电压和逆变器直流输入电压的要求。调制比通常低于 1.0，但为了尽可能多传输直流功率需接近 1.0。根据制造商推荐的最高采样时间确定调频指数，以限制总谐波畸变率。组件串以及组件串的组件数量可根据升压变换器的输入电压确定。升压变换器和逆变器数量根据光伏电站输出功率确定。

5.11　蓄电池储能系统

蓄电池的额定容量单位为安时（Ah）。安时表述蓄电池储能能力：1Ah 意味着蓄电池可以持续 1h 输送 1A 电流。类似地，一个 110Ah 的蓄电池可以持续 11h 输送 10A 电流。然而，当蓄电池放电 1h 后，需要的充电时间将超过 1h。据估计，为了保持同样的充电状态，需要存储 1.25Ah 容量。蓄电池的运行特性也随着温度、蓄电池类型和寿命变化。铅酸蓄电池技术成熟，且在各类电力工业中广泛应用。

深循环铅酸蓄电池最近的进步促进了需要快速充放电的蓄电池储能系统的应

用。例如，如果负荷需要900Ah的蓄电容量，可设计不同种类的蓄电池储能系统。第一个设计方案是并联3个容量为300Ah的深循环蓄电池。第二个设计为并联2个容量为450Ah的蓄电池。最后，可使用一个独立的大型工业用蓄电池。铅酸蓄电池每个单格的电压约为2.14V。对于常用的12V蓄电池，额定电压大约为12.6～12.8V之间。

蓄电池最主要的问题是，如果在一串电池单格中有一个单格发生故障，则整个蓄电池组将迅速放电，超过要求的放电水平；这将使蓄电池组产生永久性损坏。

行业惯例是并联蓄电池串数量不要超过3个。需要监测每个电池串，以保证每个蓄电池串的充放电速率相等。如果一旦发生不相等情况，将会导致弱电池单格以及整个蓄电池组损坏。另外一个行业惯例是不要通过增加新电池串来为旧蓄电池组扩容。就蓄电池老化来说，并非所有电池单元的老化程度都一致。某些电池单格将会向周围电池单格送出电流，且很难检测到。如果一个电池单格损坏，将改变蓄电池串的阻抗，则整个电池串的寿命迅速降低。蓄电池系统将因此损坏。并联多个蓄电池串会增加各串间电压不等的可能性；因此，对于优化的蓄电池储能系统，系统应使用满足负荷需求的单串联蓄电池单格。

在给定时间段内，蓄电池容量可以用负荷功耗（W）乘以负荷计划运行小时数得到。这将得到能耗值，单位为瓦时（或千瓦时［kWh］），公式为

$$\mathrm{kWh} = \mathrm{kV} \cdot \mathrm{Ah} \tag{5-25}$$

例如，一个60W的灯泡运行1h使用了60Wh电量。然而，如果相同的灯泡由12V蓄电池供电，则需消耗5Ah的容量。因此，为了计算给定负荷的需要储能容量，需要将其每日消耗电量除以蓄电池电压。这里有另外一个例子，如果负荷每天从48V蓄电池储能系统获得5kWh的电量，将电量除以蓄电池电压就可以得到需要的安时容量。在这个例子中，需要的蓄电池容量为105Ah。然而，由于不希望蓄电池放电深度高于50%，蓄电池储能容量应当为210Ah。如果这个负荷需运行4天，则需要的容量为840Ah。如果蓄电池电缆与地面绝缘不良，那么直流系统和地面之间的容性耦合可能会产生直流系统到地下金属器件之间的漏电流，这将会腐蚀地下金属结构。典型蓄电池储能系统参数见表5-23。

表5-23　典型蓄电池储能系统参数

1级	34～40Ah	12V
2级	70～85Ah	12V
3级	85～105Ah	12V
4级	95～125Ah	12V
5级	180～215Ah	12V
6级	225～255Ah	12V
7级	180～225Ah	6V
8级	340～415Ah	6V

在当前的电能效率下，对于大功率应用系统来说，蓄电池储能仍然是很贵的。然而，在接入可再生能源的电力系统中，对于间歇式可再生能源系统，如风电和光伏系统，蓄电池储能系统是其高效利用的重要技术。电网公司对大型储能系统的接入很感兴趣，可将其看作综合储能，可以用来捕捉配电网系统中高穿透率的光伏发电和风电。爬坡能力至少1h的综合储能系统可以应用在电力系统控制中。对于电网公司这是一个很重要的考虑因素，因为安装的储能系统可以用作旋转备用。

储能系统在充电、放电和每个电池串的退出时间上都需要有效和高效的安排。因此，蓄电池储能系统需要充分监控。这些课题都正在研究中[13,14]。

5.12 基于单单格蓄电池的储能系统

汽车产业的快速电气化对储能技术及其在静态电源上的应用有巨大影响。目前，镍氢（Nickel Metal Hydride，NiMH）电池广泛应用于社会上电动汽车和混合动力汽车中。锂离子电池是目前蓄电池中性能最好的。目前，电网级可再生能源储能系统的成本大约为300~500美元/kWh。随着更多公司在开发新技术，成本正迅速降低。

大型蓄电池储能系统由多个电池单格[13-15]构成，可看作多单格蓄电池系统。多单格蓄电池的运行特性与输出电压、内阻抗、电池连接、放电电流以及电池单格寿命有关[13-15]。

单单格蓄电池技术发展迅速，例如，一种新的锂电池正在开发中。单单格蓄电池的价格也在急剧下降。与常规的内部由12个电池单格串联、电压为12V的铅酸蓄电池相比，单单格蓄电池可单独连接及重新配置。另外，由于独立的单单格蓄电池的充电率和放电率可以监测，则可以评估电池串的健康状况和运行特性。图5-33显示了包含3个单单格电池的电池串。

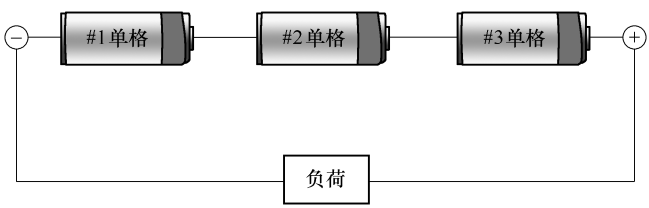


图5-33 含3个单单格电池的电池串

图5-34所示的蓄电池储能系统含两个蓄电池串，每串含3个单单格电池，2个电池串并联可得到电池方阵。

表5-24为两种单单格蓄电池的能量密度和功率密度。

表5-25为与单单格蓄电池相比，铅酸蓄电池储能系统的能量密度和成本。所有蓄电池的放电电流容量性能都会随着反复充电而发生变化。正如预期的，放电电

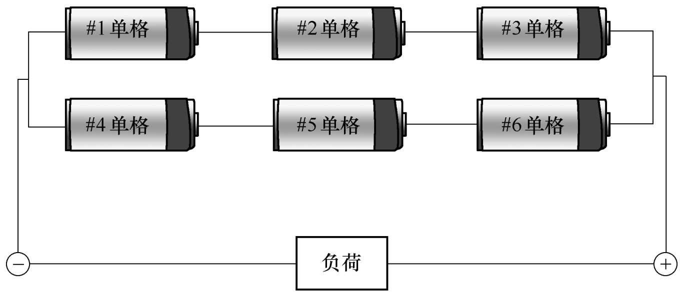


图 5-34　含 3 个单单格电池的 2 个电池串并联

流越高，剩下的容量和输出电压越低，内阻抗就越高。然而，在下一个放电周期之前，在蓄电池休息后，由于高放电电流引起的容量降低将会恢复。

表 5-24　蓄电池能量密度和功率密度比较

蓄电池类型	能量密度/(Wh/kg)	储能电量/kWh	可用能量比例（%）
镍氢电池	65	40～50	80
锂离子	130	40～50	80

表 5-25　储能系统的能量密度和成本

类　型	Wh/kg	Wh	重量/kg	美元/kg	美元/kWh	美元/kW
标准	35	1875	75	2.5	100	9.35
薄膜	20	1000	50	4.0	200	10.0
镍氢电池	45	1800	40	22.5	500	45.0
锂离子	65	1170	18	45	700	41.0

因此，多单格蓄电池系统的设计和优化需要对不同运行条件下储能系统放电特性有深刻了解。而且，如果蓄电池储能系统用作配电网系统的综合储能系统，则需要蓄电池系统的动态模型。蓄电池系统的动态模型将帮助调整间歇式绿色能源的出力。

例 5.5　设计一个微电网，负荷为 1000kW，交流电压为 460V，通过变压器接入 13.2kV 电网，变压器额定容量为 2MVA，电压比为 460V/13.2kV，电抗为 10%。为了支持紧迫负荷，微电网需要 200kWh 的储能系统，可每天使用 8h。三相逆变器参数见表 5-26。光伏系统参数与例 5.4 中一致。

确定以下参数：

1）光伏方阵、变换器、逆变器、储能系统的容量，以及根据最小表面积得到的设计接线图。另外，计算每类光伏组件对应的成本、重量和面积，并以表格形式给出结果。

2）设计的标幺值模型。

表 5-26　三相逆变器参数

逆　变　器	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
功率	100kW	250kW	500kW	1MW
输入直流电压	900V	900V（最高）	900V	900V
输出交流电压	660V（AC)/60Hz	660V（AC)/60Hz	480V（AC)/60Hz	480V（AC)/60Hz
效率	最高效率 96.7%	最高效率 97.0%	最高效率 97.6%	最高效率 96.0%
长度	30.84in	38.2in	43.1in	71.3in
宽度	57in	115.1in	138.8in	138.6in
高度	80in	89.2in	92.6in	92.5in
重量	2350lb	2350lb	5900lb	12000lb

解

1）负荷为 1000kW，额定电压为交流 460V。根据负荷电压以及调制比 0.9，可以得到逆变器的直流输入电压：

$$V_{\text{idc}}=\frac{2\sqrt{2}V_{\text{LL}}}{\sqrt{3}\cdot M_{\text{a}}}=\frac{2\sqrt{2}\times460}{\sqrt{3}\times0.9}\text{V}=835\text{V}$$

选择额定容量为 250kW 的逆变器，则传输 1000kW 功率需要的逆变器数量 NI 为

$$NI=\frac{\text{光伏电站容量}}{\text{逆变器额定容量}}$$

$$NI=\frac{1000}{250}=4$$

本设计中，4 个逆变器应当并联。如果开关频率为 5.04kHz，则调频指数为

$$M_{\text{f}}=\frac{f_{\text{S}}}{f_{\text{e}}}=\frac{5040}{60}=84$$

逆变器技术参数见表 5-27。

表 5-27　逆变器技术参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_{a}	调频指数 M_{f}
4	835	250	460	0.90	84

读者应当认识到其他设计也是可行的。光伏电站的直流输入电压决定了逆变器的交流输出电压。表 5-28 为每类光伏组件的参数。

表 5-28 基于不同类型光伏组件的光伏系统设计

组件类型	单个组件表面积/ft^2	额定功率/W	单位功率面积（ft^2/W）
1	12.47	190	0.066
2	15.68	200	0.078
3	16.97	170	0.100
4	7.07	87	0.081

如表 5-28 所示，类型 1 光伏组件需要的面积最小。选择类型 1 光伏组件，且组件串开路电压设为 550V，则每串中组件数量 NM 为

$$NM = \frac{\text{组件串电压}}{V_{\mathrm{MPP}}}$$

式中，V_{MPP}为组件参数中的光伏组件最大功率点电压。

$$NM = \frac{550}{54.8} \approx 10 \quad \text{类型 1}$$

组件串电压 SV 为

$$SV = NM \times V_{\mathrm{MPP}}$$

$$SV = 10 \times 54.8\mathrm{V} = 548\mathrm{V}$$

组件串功率 SP 为

$$SP = NM \times P_{\mathrm{MPP}}$$

式中，P_{MPP}为光伏组件最大功率。

$$SP = 10 \times 190\mathrm{W} = 1.9\mathrm{kW} \quad \text{类型 1}$$

如果设计每个方阵功率为 20kW，则方阵中组件串数量 NS 为

$$NS = \frac{\text{单个方阵额定功率}}{\text{单个组件串额定功率}}$$

$$NS = \frac{20}{1.9} = 11$$

方阵数量 NA 为

$$NA = \frac{\text{光伏电站额定功率}}{\text{单个方阵额定功率}}$$

$$NA = \frac{1000}{20} = 50$$

系统中光伏组件总数量 TNM 为

$$TNM = NM \times NS \times NA$$

式中，NM 为单个组件串中组件数量，NS 为单个方阵中组件串数量，NA 为光伏电站中方阵数量。

$$TNM = 10 \times 11 \times 50 = 5500 \quad \text{类型 1 组件}$$

类型 1 光伏组件需要的总面积 TS 为

$$TS=\frac{5500\times34.6\times51.9}{144}\text{ft}^2=68586\text{ft}^2=1.57\text{acre}$$

类型 1 光伏组件的总重量 TW 为组件数量和单个组件重量的乘积：

$$TW=5500\times33.07\text{lb}=181885\text{lb}$$

类型 1 光伏组件需要的总成本为组件数量和单个组件成本的乘积：

总成本 =5500×870 美元 =478 万美元　类型 1

光伏系统参数见表 5-29。

表 5-29　光伏系统参数

组件类型	每串中组件数量	单个方阵的组件串数量	方阵数量	组件串电压/V	系统总面积/ft^2	系统总重量/lb	系统总成本/百万美元
1	10	11	25	548	68586	181885	4.78

升压变换器的输出电压 V_o 和逆变器输入电压 V_{idc} 相等。

$$V_o=V_{idc}=835\text{V}$$

升压变换器的输入电压 V_i 与组件串电压相等，$SV=V_i=548\text{V}$。

升压变换器占空比为

$$D=1-\frac{V_i}{V_o}$$

本例中

$$D=1-\frac{548}{835}=0.34$$

每个方阵需要一个升压变换器。因此，升压变换器数量为 50，单台额定容量为 20kW。升压变换器参数见表 5-30。

表 5-30　升压变换器参数

升压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
50	548	20	835	0.34

表 5-23 给出了容量为 200kWh 的一些蓄电池参数。蓄电池设计中需要限制电池串中电池数量并把电池方阵数量限制在 3 个以下。这些限制适用于铅酸蓄电池，以延长储能系统寿命。我们选择第 6 级蓄电池，额定容量为 255Ah，额定电压为 12V。本设计中，每串含 3 个蓄电池，每个方阵含 3 个电池串。则储能系统中电池串电压 SV 为

$$SV=3\times12\text{V}=36\text{V}$$

单个蓄电池存储的能量 SES 为电池容量和电池电压的乘积。

$$SES=255\times12\text{Wh}=3.06\text{kWh}$$

每个电池方阵有 9 个电池。因此，方阵存储的电能 AES 为

$$AES=9\times3.06\text{kWh}=27.54\text{kWh}$$

蓄电池方阵参数见表5-31。

表5-31 蓄电池方阵参数

蓄电池等级	每串中蓄电池数量	方阵中电池串数量	方阵数量	蓄电池串电压/V	单个方阵存储电量/kWh
6	3	3	8	36	27.54

用以存储200kWh能量的方阵数量 NA 为

$$NA=\frac{\text{总电量}}{\text{单个方阵电量}}$$

$$NA=\frac{200}{27.54}\approx8$$

由于使用8个电池方阵，每个方阵需配备一个升降压变换器。因此，总共需要8个升降压变换器。升降压变换器用来给蓄电池储能系统进行充放电管理。

本例中，升降压变换器的输入是直流母线电压，为835V，输出直流电压必须为36V，以为蓄电池储能系统充电。如果储能系统使用8h，则它的放电深度为额定容量的50%。因此，蓄电池系统可以提供100kWh电量。储能系统发出的功率 P 为

$$P=\frac{\text{千瓦时数}}{\text{小时数}}$$

$$P=\frac{100}{8}\text{kW}=12.5\text{kW}$$

电池方阵功率 AP 为

$$AP=\frac{\text{储能系统功率}}{\text{方阵数量}}$$

$$AP=\frac{12.5}{8}\text{kW}=1.56\text{kW}$$

因此，可选择额定容量为1.56kW的升降压变换器。占空比为

$$D=\frac{V_o}{V_i+V_o}$$

$$D=\frac{36}{835+36}=0.04$$

升降压变换器参数见表5-32。

表5-32 升降压变换器参数

升降压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
8	835	1.56	36	0.04

图 5-35 为该例中光伏系统的接线图。

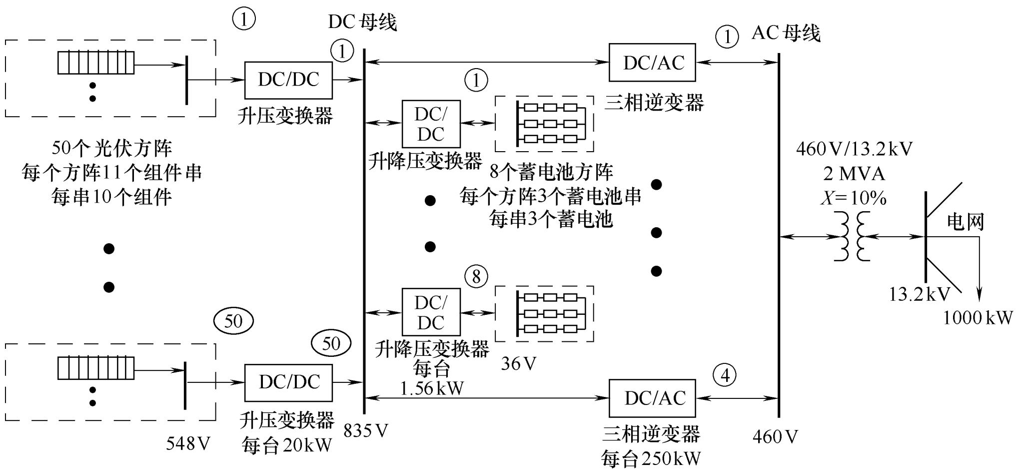


图 5-35　例 5.5 接线图

2）为了计算标幺值系统，设容量基值为 $S_b=1\text{MVA}$，则图 5-35 中系统基值为

容量基值为 $E_b=1\text{MWh}$；

电网侧电压基值为 13.2kV；

变压器低压侧电压基值为 460V；

在新容量基值为 1MVA 基础上，变压器阻抗的新标幺值为

$$X_{\text{pu变压器(new)}}=X_{\text{pu变压器(old)}}\times\frac{S_{\text{b(new)}}}{S_{\text{b(old)}}}\times\left(\frac{V_{\text{b(old)}}}{V_{\text{b(new)}}}\right)^2$$

$$X_{\text{pu变压器(new)}}=0.1\times\frac{1}{2}\times\left(\frac{13.2}{13.2}\right)^2=0.05\text{pu}$$

逆变器容量标幺值 P_{pu} 为

$$P_{pu}=\frac{\text{额定功率}}{S_b}$$

$$P_{\text{pu-逆变器}}=\frac{250\times10^3}{1\times10^6}=0.25\text{pu}$$

同理，升压变换器容量的标幺值为

$$P_{\text{pu-升压变换器}}=\frac{20\times10^3}{1\times10^6}=0.020\text{pu}$$

逆变器直流侧电压基值为 835V。因此，逆变器直流侧电压标幺值 V_{pu} 为

$$V_{pu}=\frac{835}{835}=1\text{pu}$$

由于升压变换器低压侧电压基值和额定电压相等，所以标幺值为 1pu。储能系统的情况也一样。

同样，升降压变换器和储能系统的容量标幺值计算如下：

$$P_{\text{pu升降压变换器}}=\frac{1.56\times10^{3}}{1\times10^{6}}=0.001\text{pu}$$

$$\text{存储电量}=\frac{27.54\times10^{3}}{1\times10^{6}}=0.027\text{pu}$$

系统标幺值模型如图 5-36 所示。

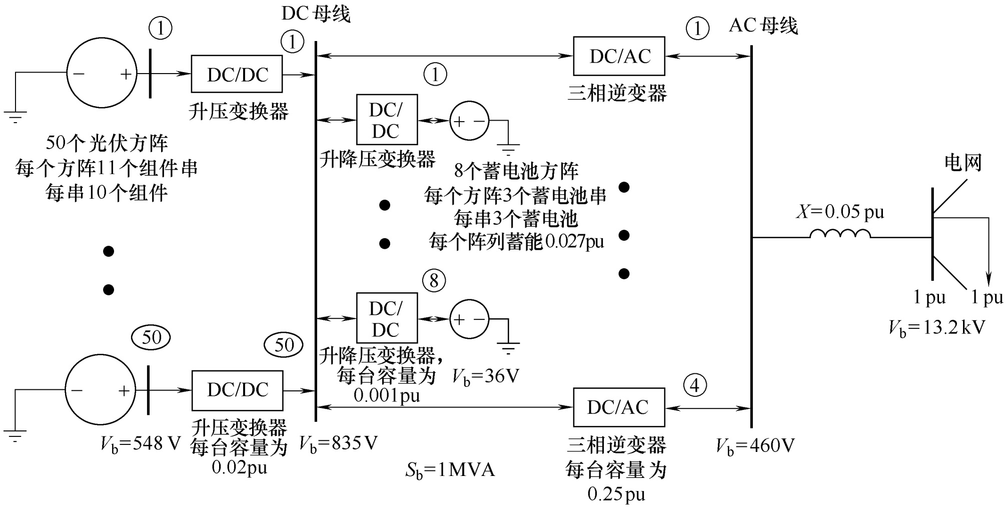


图 5-36　例 5.5 系统的标幺值模型

例 5.6　使用表 5-17 中数据设计一个微电网光伏系统，假设总负荷为 500kW，电压为三相交流 460V，频率为 60Hz。

对于每一种类型光伏系统，确定以下参数：

1）组件串中组件数量、方阵中组件串数量、方阵数量、重量和表面积；

2）升压变换器和逆变器参数，以及系统接线图。

解

负荷容量为 500kW，额定电压为交流 460V。根据负荷电压以及调制比 0.9，可由式（5-16）求得三相逆变器的直流输入电压：

$$\frac{2\sqrt{2}\times460}{\sqrt{3}\times0.9}\text{V}=835\text{V}$$

1）组件串最大电压限制在 600V，为提高组件串电压，需使用升压变换器。

如果选择组件串电压 SV 为 550V，则根据式（5-13），可得到每串组件数量 NM：

$$NM=\frac{550}{54.8}\approx10\quad\text{类型 1}$$

$$=\frac{550}{26.3}\approx21\quad\text{类型 2}$$

$$=\frac{550}{28.7}\approx 20 \quad 类型 3$$

$$=\frac{550}{17.4}\approx 32 \quad 类型 4$$

从式（5-14）可知，组件串电压 *SV* 为

$$SV = 10\times 54.8\text{V} = 548\text{V} \quad 类型 1$$
$$= 21\times 26.3\text{V} = 552\text{V} \quad 类型 2$$
$$= 20\times 28.7\text{V} = 574\text{V} \quad 类型 3$$
$$= 32\times 17.4\text{V} = 557\text{V} \quad 类型 4$$

从式（5-9）可知，组件串功率为

$$SP = 10\times 190\text{W} = 1.9\text{kW} \quad 类型 1$$
$$= 21\times 200\text{W} = 4.2\text{kW} \quad 类型 2$$
$$= 20\times 170\text{W} = 3.4\text{kW} \quad 类型 3$$
$$= 32\times 87\text{W} = 2.784\text{kW} \quad 类型 4$$

如果设计每个方阵额定容量为 20kW，则根据式（5-15），组件串数量 *NS* 为

$$NS = \frac{20}{1.9}\approx 11 \quad 类型 1$$

$$=\frac{20}{4.2}\approx 5 \quad 类型 2$$

$$=\frac{20}{3.4}\approx 6 \quad 类型 3$$

$$=\frac{20}{2.784}\approx 8 \quad 类型 4$$

根据式（5-17），方阵数量 *NA* 为

$$NA = \frac{500}{20} = 25$$

光伏组件总数量 *TNM* 由式（5-19）得到：

$$TNM = 10\times 11\times 25 = 2750 \quad 类型 1$$
$$= 21\times 5\times 25 = 2625 \quad 类型 2$$
$$= 20\times 6\times 25 = 3000 \quad 类型 3$$
$$= 32\times 8\times 25 = 6400 \quad 类型 4$$

每类光伏组件对应的总表面积 *TS* 可由组件数量和每个组件面积计算得到。

$$TS = \frac{2750\times 34.6\times 51.9}{144} = 34294\text{ft}^2 = 0.787\text{acre} \quad 类型 1$$

$$=\frac{2625\times 38.6\times 58.5}{144} = 41164\text{ft}^2 = 0.944\text{acre} \quad 类型 2$$

$$=\frac{3000\times 38.3\times 63.8}{144} = 50907\text{ft}^2 = 1.169\text{acre} \quad 类型 3$$

$$= \frac{6400 \times 25.7 \times 39.6}{144} = 45232\text{ft}^2 = 1.038\text{acre} \quad 类型4$$

总重量为

$$总重量 = 2750 \times 33.07\text{lb} = 90943\text{lb} \quad 类型1$$
$$= 2625 \times 39.00\text{lb} = 102375\text{lb} \quad 类型2$$
$$= 3000 \times 40.70\text{lb} = 122100\text{lb} \quad 类型3$$
$$= 6400 \times 18.40\text{lb} = 117760\text{lb} \quad 类型4$$

每类组件对应的总成本为

$$总成本 = 2750 \times 870 = 239 万美元 \quad 类型1$$
$$= 2625 \times 695 = 182 万美元 \quad 类型2$$
$$= 3000 \times 550 = 165 万美元 \quad 类型3$$
$$= 6400 \times 397 = 254 万美元 \quad 类型4$$

各光伏组件类型对应系统的参数见表5-33。

表5-33 各光伏组件类型对应系统的参数

组件类型	每串组件数量	单个方阵的组件串数量	方阵数量	组件串电压/V	系统总面积/ft²	系统总重量/lb	系统总成本/百万美元
1	10	11	25	548	34294	90943	2.39
2	21	5	25	552	41164	102375	1.82
3	20	6	25	574	50907	122100	1.65
4	32	8	25	557	45232	117760	2.54

2）每个方阵需配备一个升压变换器。变换器数量为25，每台额定容量为20kW。变换器额定输出电压和逆变器输入电压一致。

$$V_{idc} = V_o = 835\text{V}$$

升压变换器输入电压 V_i 和组件串电压相同。

$$V_i = 548\text{V} \quad 类型1$$
$$V_i = 552\text{V} \quad 类型2$$
$$V_i = 574\text{V} \quad 类型3$$
$$V_i = 557\text{V} \quad 类型4$$

升压变换器占空比为

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{548}{835} = 0.34 \quad 类型1$$

$$= 1 - \frac{552}{835} = 0.34 \quad 类型2$$

$$=1-\frac{574}{835}=0.31\quad 类型3$$

$$=1-\frac{557}{835}=0.33\quad 类型4$$

升压变换器参数见表 5-34。

表 5-34　升压变换器参数

组件类型	升压变换器数量	输入电压 V_i/V	额定功率/kW	输出电压 V_o/V	占空比 D
1	25	548	20	835	0.34
2	25	552	20	835	0.34
3	25	574	20	835	0.31
4	25	557	20	835	0.33

逆变器需能承受升压变换器的输出电压，且传输需要的功率。选择额定容量为 100kW，输入电压为 835V 的逆变器，调制比为 0.9，交流侧输出电压为 460V。

由式（5-18）可知，为传输 500kW 功率，需要的逆变器数量 NI 为

$$NI=\frac{500}{100}=5$$

因此，需要并联 5 个逆变器来输送 500kW 功率。

为了限制总谐波畸变，选择开关频率为 10kHz，则调频指数为

$$M_f=\frac{f_S}{f_e}=\frac{10000}{60}=166.67$$

系统接线图如图 5-37 所示。逆变器参数见表 5-35。

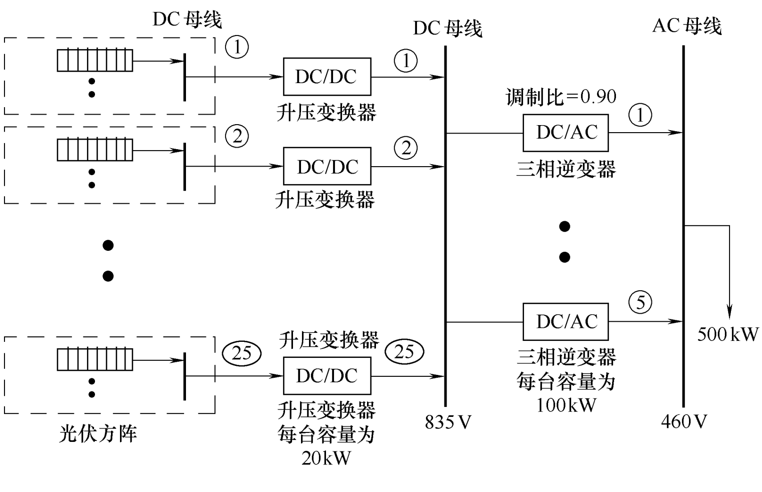


图 5-37　例 5.6 的接线图

表 5-35　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
5	835	100	460	0. 90	166. 67

例 5.7　假设一个住宅总负荷从晚上 11 点到早晨 8 点为 7. 5kW，其余时间为 15kW。确定以下各项：

1）画出 24h 负荷曲线。

2）24h 消耗的总电量（kWh）。

3）如果太阳每天光照时间 8h，辐照度为 0. 5 日照强度（500W/m^2），那么，为了 24h 运行提供足够电量，需要多大的屋顶面积？

4）假设夜间用电量最大为日用电量的 40%。上网寻找并选择一个蓄电池储能系统，给出设计参数。

解

1）负荷为 9h（晚上 11 点至早晨 8 点）7. 5kW，15h（早上 8 点至晚上 11 点）15kW。负荷曲线如图 5-38 所示。

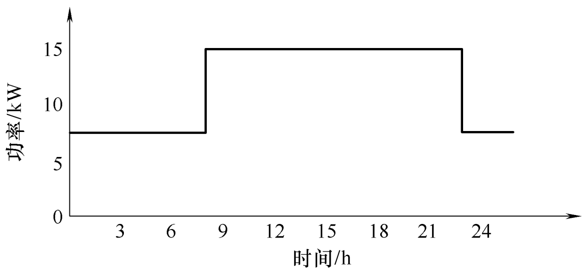


图 5-38　例 5. 7 中每日负荷曲线图

2）24h 耗电量为日负荷曲线下方的面积，计算公式为 kWh = kW × h。因此，总耗电量 = 7. 5 × 9kWh + 15 × 15kWh = 292. 5kWh。

3）选择类型 1 光伏组件，因为其单位功率需要的面积最小。

类型 1 光伏组件（见表 5-17）的每个组件在 1000W/m^2 辐照度下发出功率 190W。因此，500W/m^2 辐照度下 8h 可发出电量为 0. 5 × 190 × 8Wh = 0. 76kWh。

需要的组件数量 NM 为

$$NM = \frac{\text{需要的总电量}}{\text{单个组件电量}}$$

$$NM = \frac{292.5}{0.76} \approx 385$$

单个组件表面积 SM 为长度和宽度的乘积：

$$SM = 34.6 \times \frac{51.9}{144}\text{ft}^2 = 12.47\text{ft}^2$$

发出 292.5kWh 电量的总面积 TS 为组件数量和单个组件面积相乘得到：

$$TS = 385 \times 12.47\text{ft}^2 = 4801.11\text{ft}^2$$

4）夜间用电量为总用电量的 40%。因此，夜间用电量 = 0.4 × 292.5kWh = 117kWh。

从表 5-23 中选择类型 6 蓄电池储能系统来为夜间用电存储电量。为了保护储能系统，蓄电池放电深度不得超过 50% 额定容量。

每个蓄电池存储电量为蓄电池容量和电压的乘积（Ah × V）。因此，单个蓄电池存储电量 = 255 × 12Wh = 3.06kWh。需要的蓄电池数量 NB 为

$$NB = \frac{2 \times \text{需要的电量}}{\text{单个蓄电池存储电量}}$$

$$NB = \frac{2 \times 117}{3.06} = 77$$

每个蓄电池串含 3 个蓄电池；每个方阵蓄电池串数量最多为 3 个。因此，每个方阵的蓄电池数最多为 3 × 3 = 9。

蓄电池方阵数量为

$$NA = \frac{\text{蓄电池总的数量}}{\text{单个方阵中蓄电池数量}}$$

$$NA = \frac{77}{9} = 8$$

例 5.8　设计一个 2MW 微电网系统，以 13.2kV 电压接入当地电网。

当地电网使用以下设计数据：

a）变压器参数为 13.2kV/460V，2MVA，10% 阻抗；460V/220V，20kVA，5% 阻抗。

b）光伏系统参数见表 5-17。

确定以下各项：

1）组件串中组件数量、方阵中组件串数量、方阵数量、表面积、重量和成本。

2）逆变器参数和系统接线图。

解

交流电压为 220V 的三相逆变器容量通常约为 20kW。根据 20kW 三相逆变器、220V 交流输出电压和调制比 0.9，直流输入电压可由式（5-16）得到。

$$V_{\text{idc}} = \frac{2\sqrt{2} \times 220}{\sqrt{3} \times 0.9}\text{V} = 399\text{V}$$

1）表 5-36 给出了 4 类光伏组件的参数。

表 5-36 光伏组件单位功率重量

组件类型	单个组件表面积/ft^2	额定功率/W	单位功率重量/(lb/W)
1	33.07	190	0.174
2	39.00	200	0.195
3	40.70	170	0.239
4	18.30	87	0.210

从表 5-36 可以看出，类型 1 组件单位功率重量最小；因此将选择该类组件。光伏系统的组件串电压应当与逆变器输入电压一致。

从式（5-13）可知，组件串电压 SV 为 400V，则一个组件串中组件数量 NM 为

$$NM = \frac{400}{54.8} \approx 7$$

因此，使用 7 个组件时，由式（5-14）可知组件串电压为

$$SV = 7 \times 54.8\text{V} = 384\text{V}$$

从式（5-9）可知，组件串功率 SP 为

$$SP = 7 \times 190\text{W} = 1.33\text{kW}$$

设计单个方阵额定功率为 20kW，则方阵中组件串数量 NS 可由式（5-15）获得

$$NS = \frac{20}{1.33} = 15$$

系统中方阵数量 NA 可由式（5-17）得到：

$$NA = \frac{2000}{20} = 100$$

从式（5-19）可知，光伏组件总数量 $TNM = 7 \times 15 \times 100 = 10500$

使用类型 1 光伏组件时，系统总的表面积 TS 由单个组件面积和总的组件数量计算得到。

$$TS = \frac{10500 \times 34.6 \times 51.9}{144}\text{ft}^2 = 130940\text{ft}^2 = 3\text{acre}$$

使用类型 1 光伏组件时，系统总重量 TW 由单个组件重量和总的组件数量计算得到。

$$TW = 10500 \times 33.07\text{lb} = 347235\text{lb}$$

使用类型 1 光伏组件时，系统总成本为单个组件成本和组件数量的乘积：

$$\text{光伏组件总成本} = 10500 \times 870 \text{ 美元} = 914 \text{ 万美元}$$

2000kW 光伏系统参数见表 5-37。

2）每个方阵配置一个逆变器。因此，每个逆变器容量也为 20kW。

由式（5-18）可知，传输 2000kW 功率需要的逆变器数量 NI 为

表 5-37　2000kW 光伏系统参数

组件类型	每串组件数量	单个方阵组件串数量	方阵数量	组件串电压/V	组件串功率/kW	系统总面积/ft^2	系统总重量/lb	系统总成本/百万美元
1	7	15	100	384	1.33	130940	347235	914

$$NI = \frac{2000}{20} = 100$$

对于 2000kW 光伏电站，需要并联 100 个逆变器。也可以使用更大容量逆变器的设计。对于本设计，逆变器的直流输入电压和组件串电压一致。

$$V_{\mathrm{idc}} = V_{\mathrm{string}} = 384\mathrm{V}$$

根据直流输入电压和交流输出电压，调制比为

$$M_{\mathrm{a}} = \frac{2\sqrt{2} \times 220}{\sqrt{3} \times 384} = 0.93$$

若开关频率为 10kHz，则调频指数 M_{f} 为

$$M_{\mathrm{f}} = \frac{f_{\mathrm{S}}}{f_{\mathrm{e}}} = \frac{10000}{60} = 166.67$$

逆变器参数见表 5-38。图 5-39 为系统的接线图。使用 100 个容量为 20kVA、阻抗为 5% 的变压器，将逆变器出口电压由 220V 提升至 460V。最终，一个容量为 2MVA，电压比为 460V/13.2kV，阻抗为 10% 的变压器将系统接至当地电网。

表 5-38　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_{a}	调频指数 M_{f}
100	384	20	220	0.93	166.67

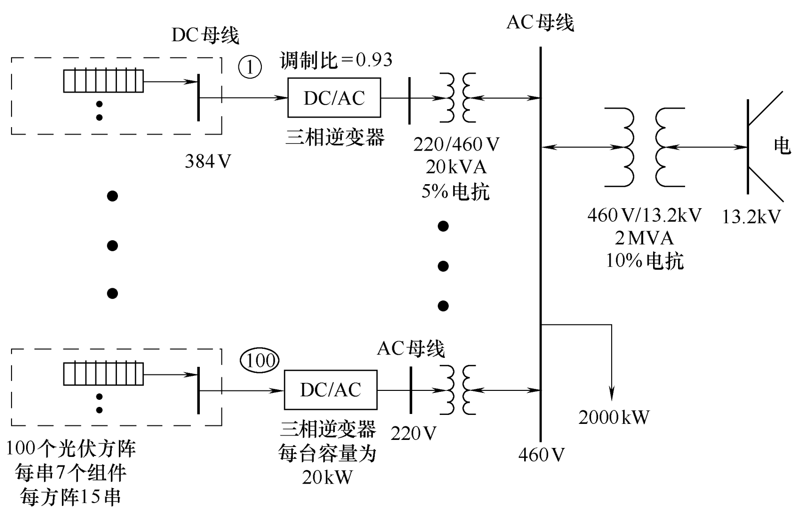


图 5-39　例 5.8 的系统接线图

另外，读者应当认识到还可能有许多其他设计。每个设计都有必须要考虑的限制。为了满足设计需要，以上分析可能有变。

例 5.9　设计一个 1000kW 光伏微电网系统，通过一个电压比为 220V/13.2kV，容量为 500kVA，5% 阻抗的变压器接至当地电网。以 220V 电压为 500kW 当地负荷供电。通过一台双向整流器，一个 100kWh 的蓄电池储能系统接入光伏系统交流母线，每天使用 8h。

解

图 5-40 为例 5.9 所述的微电网系统。从表 5-36 的 4 类组件中选择重量最轻的类型 1 组件。根据组件串电压，可由式（5-13）得到单个组件串中组件数量：

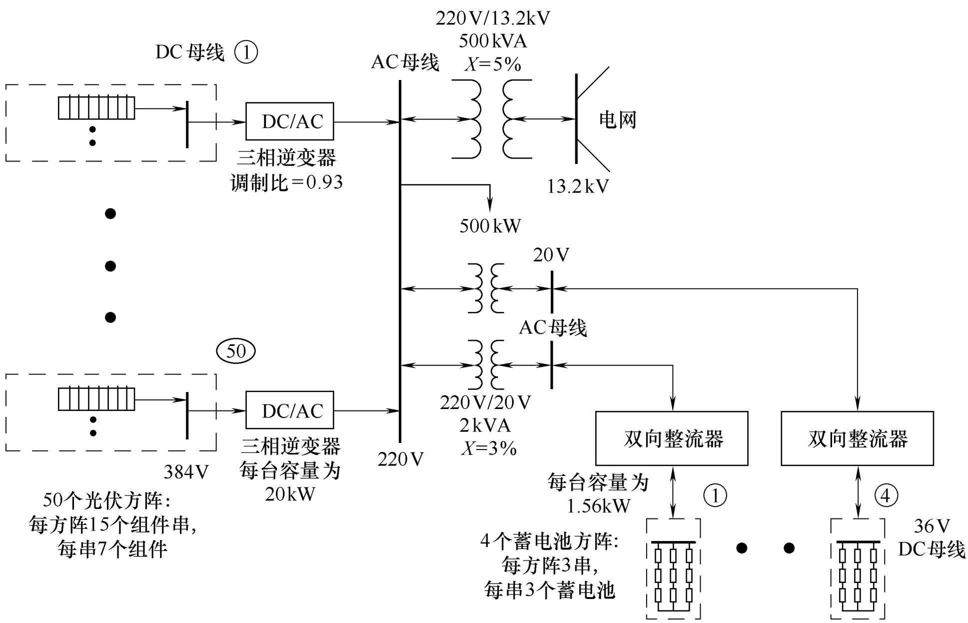


图 5-40　例 5.9 光伏系统接线图

$$NM = \frac{400}{54.8} \approx 7$$

若 NM 为 7，则由式（5-14）可知，组件串电压 SV 为

$$SV = 7 \times 54.8\text{V} = 384\text{V}$$

由式（5-9）可知，组件串功率 SP 为

$$SP = 7 \times 190\text{W} = 1.33\text{kW}$$

如果设计单个方阵功率为 20kW，则从式（5-15）可知，每个方阵中组件串数量 NS 为

$$NS = \frac{20}{1.33} = 15$$

由式（5-17）可知，方阵数量 NA 为

$$NA=\frac{1000}{20}=50$$

由式（5-19）可知，光伏组件总数量 TNM 为

$$TNM=7\times15\times50=5250$$

使用组件类型 1 需要的总面积 TS 为

$$TS=\frac{5250\times34.6\times51.9}{144}=65470\text{ft}^2=1.50\text{acre}$$

类似地，可以计算出总重量和总成本。

$$总重量=5250\times33.07\text{lb}=173618\text{lb}$$

$$总成本=5250\times870\ 美元=456\ 万美元$$

1000kW 光伏系统参数见表 5-39。

表 5-39　1000kW 光伏系统参数

组件类型	每串的组件数量	单个方阵的组件串数量	方阵数量	组件串电压/V	系统总面积/ft^2	系统总重量/lb	系统总成本/万美元
1	7	15	50	384	65470	173618	456

每个逆变器容量应与一个方阵容量相等，即为 20kW。由于逆变器直流输入电压为 384V，交流输出电压为 220V，调制比 M_a 为

$$M_a=\frac{2\sqrt{2}\times220}{\sqrt{3}\times384}=0.93$$

从式（5-18）可知，1000kW 光伏系统需要的逆变器数量 NI 为

$$NI=\frac{1000}{20}=50$$

因此，为了输出 1000kW 功率，每个方阵都需要配置一个逆变器，即共需要连接 50 个逆变器。

选择开关频率为 5.04kHz。因此，调频指数为

$$M_f=\frac{f_S}{f_e}=\frac{5040}{60}=84$$

逆变器参数见表 5-40。

表 5-40　逆变器参数

逆变器数量	输入电压 V_{idc}/V	额定功率/kW	输出电压 V_{AC}/V	调制比 M_a	调频指数 M_f
50	384	20	220	0.93	84

选择表 5-23 中类型 6 蓄电池用于存储 100kWh 能量。

蓄电池额定容量为 255Ah，额定电压为 12V。设计每个蓄电池方阵含 3 个蓄电池串，每串 3 个蓄电池，则每个方阵含 9 个蓄电池。

蓄电池串电压 SV 为

$$SV = 3 \times 12\text{V} = 36\text{V}$$

单个蓄电池存储电量 ES 为

$$ES = \text{Ah} \times \text{V}$$

$$ES = 255 \times 12\text{Wh} = 3.06\text{kWh}$$

单个方阵存储电量 ESA 为

$$ESA = \text{蓄电池数量} \times \text{单个电池电量}$$

$$ESA = 9 \times 3.06\text{kWh} = 27.54\text{kWh}$$

存储 100kWh 需要的方阵数量 NA 为

$$NA = \frac{\text{总电量}}{\text{单个方阵电量}}$$

$$NA = \frac{100}{27.54} \approx 4$$

100kWh 容量蓄电池方阵参数见表 5-41。

表 5-41 100kWh 容量蓄电池方阵参数

蓄电池类型	每串中蓄电池数量	方阵中电池串数量	蓄电池方阵数量	蓄电池串电压/V	每个方阵存储电量/kWh
6	3	3	4	36	27.54

设计蓄电池储能系统为负荷提供 8h 电量，且蓄电池系统的放电深度为 50%。因此，蓄电池系统提供的容量应为系统额定容量的 50%。本设计中为 50kWh：

$$\text{存储功率} = \frac{50}{8}\text{kW} = 6.25\text{kW}$$

每个方阵需要提供的功率为总功率的 1/4，即 1.56kW。

通过光伏电站交流母线，双向整流器可用于为储能系统充电和放电（见例 5.9）。蓄电池储能系统中，每个方阵使用一个双向整流器。双向整流器参数见表 5-42。

表 5-42 为储能系统充电的双向整流器参数

双向整流器数量	输入交流电压/V	额定功率/kW	输入直流电压/V	调　制　比
4	20	1.56	36	0.9

选择的双向整流器调制比为 0.9，直流输出电压和蓄电池方阵电压相等。因

此，输出电压为36V，且调制比为0.9的变换器交流输入电压为

$$V_{L-L}=\frac{\sqrt{3}\times M_a\times V_{odc}}{2\sqrt{2}}$$

$$=\frac{\sqrt{3}\times 0.9\times 36}{2\sqrt{2}}V=20V$$

每个蓄电池方阵连接一个整流器，则整流器的额定功率和蓄电池方阵额定功率一致。

全部整流器的总额定容量 =4×1.56kW =6.24kW。

逆变器输出电压为220V。为了与双向整流器电压匹配，可使用变比为220/20V，3%阻抗，容量为2kVA的变压器将电压从220V降至20V。

通过一个容量为500kVA、电压比为220V/13.2kV、5%阻抗的变压器将光伏系统接入电网。

5.13 光伏组件在不同入射角度下的发电量

为了确定光伏组件的发电量，必须首先确定与太阳位置相关的组件倾角。倾角指任何区域磁针与水平面之间的相对位置关系。磁倾角在地磁赤道上为0°，在每个地磁极上为90°。辐照度定义为入射到给定区域的辐射强度，单位为 W/m^2 或 W/ft^2。太阳旋转时，阳光照射到光伏组件的角度会发生变化。光伏组件发电量和倾角之间的关系如附录C所示。

5.14 光伏发电技术现状

近年来，光伏电站的开发和安装带来了光伏系统在研究、开发和制造上的进步。尤其是2008年，西方国家光伏发电安装容量达到13.4GW，年增长率为71%，德国年安装容量最高，其次是西班牙。重要的是，近年来，并网光伏系统的增加刺激了光伏产业的发展。目前，35%的并网安装容量是集中式并网光伏电站。这进一步增加了光伏系统在应对21世纪日益增长的能源需求中的作用。

目前光伏组件效率约为12%～16%。然而，正在研究中的组件效率将达到36%，即在同样条件下可将发出功率从300W提高到900W。效率更高的光伏组件的研发正在全世界范围内进行。由多层电池构成的光伏组件理论效率上限为60%。未来，预计可制造出额定容量为1.5MW的光伏组件；目前集中式光伏电站有可能达到200日照强度。

大功率逆变器技术可达到2MW等级。太阳能板的设计电压为600V。在意大利，Rende光伏电站使用了1MW的逆变器，年发电量为1.4GWh[16]。该设计使用

的是 180W 的光伏板。未来的 5 ~ 10 年内，可以预见屋顶光伏系统容量会扩展至 2MW。从 PV 角度看，达到该目标轻而易举。读者可上网搜索光伏系统的最新发展[1-6]。

5.15 光伏组件模型参数估算

让我们重温一下光伏电池的单二极管模型等效电路。

图 5-41 所示模型为光伏组件内单电池的伏安特性[17-20]。组件包括 n_c 个电池单元，其模型可表示为

$$I = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{V+IR_s}{n_c V_t}} - 1\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \tag{5-26}$$

式（5-26）中，接点热电压 V_t 为

$$V_t = \frac{AkT_{stc}}{q} \tag{5-27}$$

使用 V_t 来表述上述公式要好于 A。使用 V_t 可很好地确定 A 值，只需改写式（5-27）为

$$A = \frac{qV_t}{kT_{stc}} \tag{5-28}$$

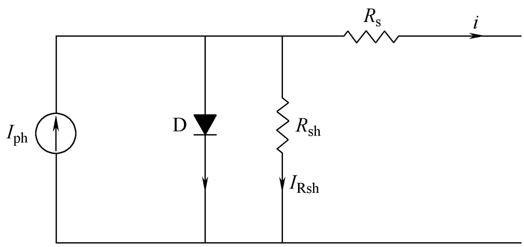


图 5-41 光伏组件的单指数模型[17]

表 5-43 为用于式（5-26）表述的组件建模需要的参数。

表 5-43 光伏组件单指数模型参数

I_{ph}	STC 下光生电流
I_o	STC 下暗饱和电流
R_s	电池板串联电阻
R_{sh}	电池板并联电阻
n_c	电池板内串联电池数量
V_t	接点热电压
A	二极管理想品质因数
k	波尔兹曼常数
T_{stc}	STC 下热力学温度（K）
q	电子电荷

STC 表示测量光伏电池标称输出功率时的标准条件。STC 条件指，电池温度为 25℃，辐照水平为 1000W/m²，基准大气质量为 1.5 日照强度光谱辐射分布。式

（5-26）中，“－1”项远小于指数项，通常可忽略掉。

评估模型参数的关键是确定 5 个参数，分别为 I_{ph}、I_o、R_s、R_{sh}和 A，这 5 个值可由制造商提供的数据页得到。由于 A 很容易用 V_t、q、k 和 T_{stc}表示，其中 V_t 是未知的，因此，可首先求出 V_t，然后解式（5-27）得出 A 值。

可用 V-I 特性曲线来估算模型参数。这些特性指短路电流、开路电压和最大功率点。表 5-44 总结了模型评估中使用的 STC 下测量数据。

表 5-44　模型估算中使用的测量数据

I_{SC}	STC 下的短路电流
V_{OC}	STC 下的开路电压
V_{MPP}	STC 下最大功率点（MPP）电压
I_{MPP}	STC 下最大功率点（MPP）电流

式（5-26）的模型可用表 5-44 的测量数据估算。

$$I_{sc}=I_{ph}-I_o e^{\frac{I_{sc}R_s}{n_c V_t}}-\frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \tag{5-29}$$

$$I_{MPP}=I_{ph}=I_o e^{\frac{V_{MPP}+I_{MPP}R_s}{n_c V_t}}-\frac{V_{MPP}+I_{MPP}R_s}{R_{sh}} \tag{5-30}$$

$$I_{oc}=0=I_{ph}-I_o e^{\frac{V_{oc}}{n_c V_t}}-\frac{V_{oc}}{R_{sh}} \tag{5-31}$$

由于 MPP 对应的是 V-I 曲线上的最大功率点，所以

$$\left.\frac{dP}{dV}\right|_{\substack{V=V_{MPP}\\ I=I_{MPP}}}=0 \tag{5-32}$$

由于要估算 5 个参数，因此，还需要第 5 个公式。在短路时电流对电压的微分为 R_{sho}的负倒数：

$$\left.\frac{dI}{dV}\right|_{I=I_{sc}}=-\frac{1}{R_{sho}} \tag{5-33}$$

至此，含 5 个变量的 5 个公式都已建立。用 5 个公式求解 5 个参数的详细过程请参阅参考文献［17-19］。本章讨论了太阳能发电系统，尤其是带光伏微电网建模的光伏系统的开发和设计。根据与太阳位置相关的光伏板倾斜角，可以评估光伏组件的年发电量。辐照度定义为给定平面的光照强度，单位为 W/m^2 或 W/ft^2。最后给出了一种光伏组件模型估算方法。

习　　题

5.1　在互联网上找出 4 种光伏组件，按表 5-45 样式列表并比较它们的额定电压、成本、长度、宽度与重量。

5.2 在互联网上找出4种光伏组件的电压-电流特性。列表给出各运行温度下随电流变化的输入阻抗。画出各运行温度下随光伏电流负荷变化的输入阻抗图。

5.3 使用一种光伏组件的电压-电流特性设计一个额定功率为100kW、交流电压为230V的微电网，所需的光伏组件数据见表5-46，确定如下参数：

1）对于各类光伏组件，每个光伏串的组件数。

2）对于各类光伏组件，每个方阵的组件串数。

3）光伏方阵数量。

4）逆变器参数。

5）系统单线图。

5.4 按表5-46所示光伏组件数据设计一个额定功率为600kW、交流电压为460V的微型光伏系统，确定如下参数：

1）各光伏组件类型下每个光伏串中的组件数。

2）各光伏组件类型下每个方阵中的组件串数。

3）光伏方阵数量。

4）逆变器参数。

5）系统单线图。

表5-45 典型光伏组件的电压-电流特性

功率（最大）
最大功率点（MPP）电压
最大功率点（MPP）电流
V_{OC}（开路电压）
I_{SC}（短路电流）
效率
成本
列举5个V_{OC}和I_{SC}的运行温度
宽度
长度
高度
重量

表5-46 习题5.3所需的光伏组件数据

功率（最大）	400W
最大功率点（MPP）电压	52.6V
最大功率点（MPP）电流	6.1A
V_{OC}（开路电压）	63.2V
I_{SC}（短路电流）	7.0A

5.5 在互联网上检索出4种单相逆变器，用表格归纳其运行条件并进行讨论。

5.6 在互联网上检索DC/DC升压变换器、DC/AC逆变器，创建表格汇总4种DC/DC升压变换器、DC/AC逆变器的运行条件，并对结果进行讨论。

5.7 用习题5.3的光伏组件及习题5.5的逆变器设计一个230V、50kW的微电网。设计需采用尽可能少的变换器与逆变器，确定如下参数：

1）各类光伏组件情况下每个光伏串的组件数。

2）各类光伏组件情况下每个方阵的组件串数。

3）光伏方阵数量。

4）逆变器参数。

5）系统单线图。

5.8 用习题5.3的光伏组件设计一个230V、600kW的微电网，设计需使用尽可能少的变换

器与逆变器，确定如下参数：

1）各类光伏组件情况下每个光伏串的组件数。

2）各类光伏组件情况下每个方阵的组件串数。

3）光伏方阵数量。

4）逆变器参数。

5）系统单线图。

5.9　设计一个额定功率 2MW、通过智能净计量电表以 13.2kV 接入当地电网的光伏微电网。当地负荷包括 100kW 照明（额定电压为 120V）以及 500kW 交流负荷（额定电压为 220V），系统包括 700kWh 储能系统。当地变压器参数如下：13.2kV/460V、2MVA、10% 电抗；460V/230V、250kVA、7% 电抗；230V/120V，150kVA，5% 电抗。所需参数见表 5-47。

表 5-47　光伏组件参数

光　伏　板	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
功率（最大）/W	190	200	170	87
最大功率点（MPP）电压/V	54.8	26.3	28.7	17.4
最大功率点（MPP）电流/A	3.47	7.6	5.93	5.02
V_{OC}（开路电压）/V	67.5	32.9	35.8	21.7
I_{SC}（短路电流）/A	3.75	8.1	6.62	5.34
效率（%）	16.40%	13.10	16.80	>16
成本/美元	870.00	695.00	550.00	397.00
宽度/in	34.6	38.6	38.3	25.7
长度/in	51.9	58.5	63.8	39.6
厚度/in	1.8	1.4	1.56	2.3
重量/lb	33.07	39	40.7	18.3

1）通过互联网检索 4 种 DC/DC 升压变换器、整流器、逆变器，并列表。用表格汇总其运行条件，讨论与本题有关的结果及运行情况。编制 MATLAB 测试程序，并计算：

2）从有商业供货的变换器中选择微电网所需的升压变换器、双向整流器和逆变器。如果没有商业供货的变换器，则重新设计升压变换器、双向整流器、逆变器参数。

3）给出系统单线图。列表给出各类光伏情况下每个光伏串的组件数、每个光伏方阵的光伏组件串数、光伏方阵数、变换器数、重量，以及每类光伏组件所需的表面积。

4）设计 1700kWh 储能系统，在线检索并选择深循环电池储能系统。给出设计步骤和储能系统的尺寸与重量。

5）开发微电网系统的标幺值模型。

5.10　设计一个光伏微电网系统，运行电压为 DC400V（AC220V），负荷为 50kW，使用表 5-48 ~ 表 5-50 的数据。进行下列计算：

1）选择深循环电池进行 100kWh 容量的储能。

2）从商业上可选的变换器中选择升压变换器、双向整流器与逆变器（数据见表 5-48 ~ 表 5-50）。如果没有商业可选的变换器，则重新设计升压变换器、双向整流器、逆变器参数。

表 5-48 典型深循环蓄电池参数

型 号	电压/V	外形尺寸/in(mm)			重量/lb(kg)	容量/Ah							
		长度	宽度	高度		1h 放电速率	2h 放电速率	4h 放电速率	8h 放电速率	24h 放电速率	48h 放电速率	72h 放电速率	120h 放电速率
PVX-340T	12	7.71(196)	5.18(132)	6.89(175)	25(11.4)	21	27	28	30	34	36	37	38
PVX-420T	12	7.71(196)	5.18(132)	8.05(204)	30(13.6)	26	33	34	36	42	43	43	45
PVX-490T	12	8.99(228)	5.45(138)	8.82(224)	36(16.4)	31	39	40	43	49	52	53	55
PVX-560T	12	8.99(228)	5.45(138)	8.82(224)	40(18.2)	36	45	46	49	56	60	62	63
PVX-690T	12	10.22(260)	6.60(168)	8.93(277)	51(23.2)	42	53	55	60	69	73	76	79
PVX-840T	12	10.22(260)	6.60(168)	8.93(277)	57(25.9)	52	66	68	74	84	90	94	97
PVX-1080T	12	12.90(328)	6.75(172)	8.96(228)	70(31.8)	68	86	88	97	108	118	122	126
PVX-1040T	12	12.03(306)	6.77(172)	8.93(227)	66(30.0)	65	82	85	93	104	112	116	120
PVX-890T	12	12.90(328)	6.75(172)	8.96(228)	62(28.2)	55	70	72	79	89	95	98	102

3）画出系统单线图。列表给出各类光伏情况下每个光伏串的组件数、每个光伏方阵的光伏组件串数、光伏方阵数、变换器数、重量，以及每类光伏组件所需的表面积。

表 5-49　升压变换器参数

输入电压/V	输出电压/V	功率/kW
24 ~ 46	26 ~ 48	9. 2
24 ~ 61	26 ~ 63	12. 2
24 ~ 78	26 ~ 80	11. 23
24 ~ 78	26 ~ 80	11. 23
24 ~ 78	26 ~ 80	13. 1
24 ~ 98	26 ~ 100	12. 5
80 ~ 158	82 ~ 160	15. 2
80 ~ 198	82 ~ 200	14. 2
80 ~ 298	82 ~ 300	9. 5

表 5-50　单相逆变器参数

逆变器	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
功率	500W	5kW	15kW	4. 7kW
直流输入电压	500V	500V（最高）	500V	500V
交流输出电压	230V（AC）/60Hz 在 2. 17A 下	230V（AC）/60Hz 在 27A 下	220V（AC）/60Hz 在 68A 下	230V（AC）/60Hz 在 17. 4A 下
效率	最低 78% 满负荷	97. 6%	>94%	96%
长度	15. 5in	315mm	625mm	550mm
宽度	5in	540mm	340mm	300mm
高度	5. 3in	191mm	720mm	130mm
重量	9lb	23lb	170kg	20lb

5. 11　编写 MATLAB 程序，采用表 5-47 ~ 表 5-51 数据设计光伏系统，要求重量最小及逆变器数量最少。进行如下计算：

1）光伏系统功率为 5000kW，电压为 3. 2kV（AC），确定逆变器运行条件。

2）光伏系统功率为 500kW，电压为 460V（AC），确定逆变器运行条件。

3）光伏系统功率为 50kW，电压为 120V（AC），确定逆变器运行条件。

表 5-51　三相逆变器参数

逆变器	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
功率	100kW	250kW	500kW	1MW
输入直流电压	900V	900V	900V	900V
输出交流电压	660V（AC）/60Hz	660V（AC）/60Hz	660V（AC）/60Hz	660V（AC）/60Hz
效率	最高效率 96. 7%	最高效率 97. 0%	最高效率 97. 6%	最高效率 96. 0%

（续）

逆变器	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
长度	30. 84in	38. 2in	43. 1in	71. 3in
宽度	57in	115. 1in	138. 8in	138. 6in
高度	80in	89. 2in	92. 6in	92. 5in
重量	2350lb	2350lb	5900lb	12000lb

5. 12　以图 5-42 中住宅系统为对象，进行以下计算：

1）评估住宅耗电量。

2）画出住宅 24h 负荷运行周期，并计算总耗电量；

3）在网上搜寻并选择一种光伏组件，为住宅设计光伏方阵。计算光伏方阵的成本、重量以及光伏系统需要的面积。在网上选择逆变器、蓄电池储能和双向整流器。

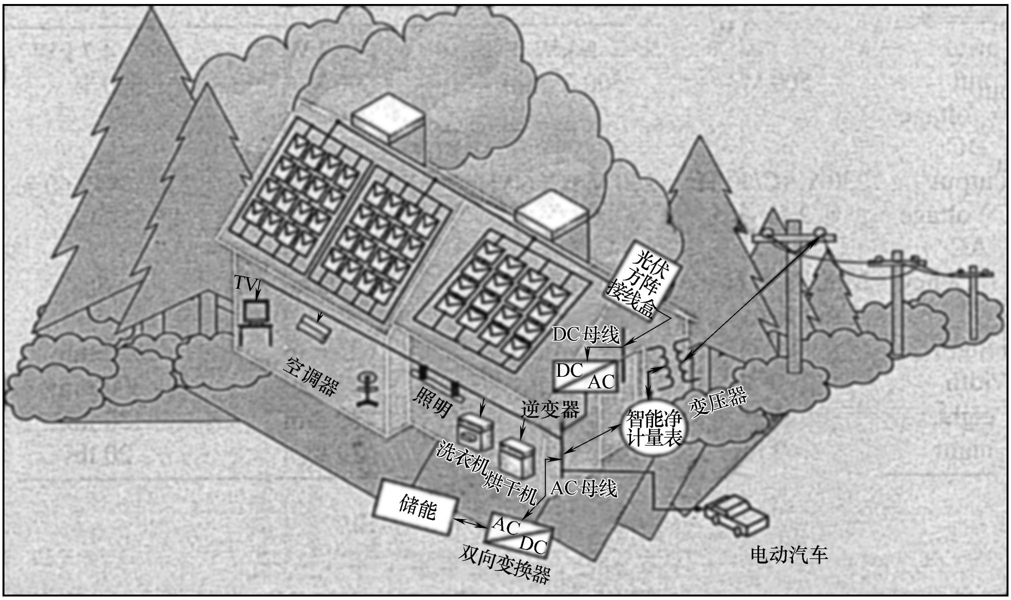


图 5-42　习题 5. 12 的图

5. 13　在习题 5. 11 中，如果夜间只有 25% 的负荷运行，使用习题 5. 10 中的数据，设计一个蓄电池储能系统，为夜间的 25% 负荷提供足够的电量。

5. 14　如果一个电网公司购售电价格均为 0. 3 美元/kWh，评估习题 5. 12 中的家庭净成本或收益。

5. 15　设计一个额定容量为 50kW，使用升压变换器和 DC/AC 逆变器的光伏系统。系统作为独立系统运行，并以 120V 电压为一个水泵系统供电。使用习题 5. 10 中的数据。

5. 16　设计一个住宅光伏系统。负荷周期为晚上 11 点到早晨 8 点之间 10kW，其余时间为 14kW。计算：

1）24h 总耗电量。

2）为了生产 24h 运行需要的电量，需要的屋顶面积为多大？

3）假设夜间用电量最多为日总用电量的 40%。在互联网上搜寻一种蓄电池储能系统，并计算夜间运行需要的电量。给出设计数据。

5.17　设计一个额定容量为 1MW，电压为 220V，频率为 60Hz 的光伏微电网，要求所有光伏组件串均连至同一条直流母线。两个变压器参数分别为 220/460V、250kVA、5% 电抗和 460V/13.2kV、1MVA、10% 电抗。使用表 5-47 ~ 表 5-51 中的数据，计算：

1）每类光伏组件下组件串中组件数量、各方阵的组件串数量、方阵数量、表面积、重量以及成本。

2）升压变换器和逆变器参数，以及系统接线图。

5.18　假设某地区一年 12 个月内总日辐照度样本数据为 **G** = [1900，2690，4070，5050，6240，7040，6840，6040，5270，3730，2410，1800]。设反射率为 0.25。计算：

1）编写一个 MATLAB M 文件，①计算不同倾斜角的辐照度，②做出不同倾斜角下各月辐照度表格，③做出不同倾斜角下每年总辐照度表格，④找出每个月和全年的最佳倾斜角。

2）如果该地区太阳辐照度为 0.4 日照强度，且每日光照时间为 8h，那么为了在最佳倾斜角下获得 20kW 功率，需要多大的屋顶面积？

3）如果全年太阳能辐照度平均值为 0.3 日照强度，且每天 5h 日照，那么在最佳倾斜角下，$1500ft^2$ 的面积能产生多少千瓦功率？

5.19　假设美国哥伦布市一年 12 个月的水平面辐照度为 **G** = [1800，2500，3500，4600，5500，6000，5900，5300，4300，3100，1900，1500]。美国哥伦布市的纬度为 40°。假设反射率为 0.25。计算：

1）编写一个 MATLAB M 文件，①计算不同倾斜角的辐照度，②做出不同倾斜角下各月辐照度表格，③做出不同倾斜角下每年总辐照度表格，④找出每个月和全年的最佳倾斜角。

2）如果该地区太阳辐照度为 0.4 日照强度，且每天光照时间为 8h，那么为了在最佳倾斜角下获得 50kW 功率，需要多大的屋顶面积？

3）如果全年太阳能辐照度平均值为 0.3 日照强度，且每日日照 5h，那么在最佳倾斜角下，$1500ft^2$ 的面积能产生多少千瓦功率？

5.20　在网络上搜寻你所在城市水平面的太阳辐照度数据 **G** 及其纬度。计算：

1）写一个 MATLAB M 文件，①计算不同倾斜角的辐照度，②做出不同倾斜角下各月辐照度表格，③做出不同倾斜角下每年总辐照度表格，④找出每个月和全年的最佳倾斜角。

2）如果全年太阳能辐照度平均值为 0.3 日照强度，且每日日照 5h，那么在最佳倾斜角下，$1500ft^2$ 的面积能产生多少千瓦功率？

5.21　根据表 5-52 提供的光伏组件参数，使用高斯-赛德尔迭代法编写一个 MATLAB 仿真测试程序估算组件参数（使用互联网资源学习高斯-赛德尔迭代法）。

表 5-52　习题 5.21 的数据

$a_1(I_{SC})$	3.87A
$a_2(V_{OC})$	42.1V
$a_3(V_{MPP})$	33.7V
$a_4(I_{MPP})$	3.56A
$a_5(n_c)$	72

参考文献

1. California Energy Commission. Energy quest, the energy story. Chapter 15: Solar energy. Available at www.energyquest.ca.gov/story. Accessed 2009 June 10.
2. Elmhurst College. Virtual Chembook. Energy from the sun. Available at http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/320sunenergy.html. Accessed 2009 July 10.
3. Deutsche Gesellshaft fur Sonnenenergie. ebook on web: Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers. Available at http://www.ebookee.net/Planning-and-Installing-Photovoltaic-Systems-A-Guide-for-Installers-Architects-and-Engineers_181296.html. Accessed 2009 July 2010.
4. British Petroleum. BP Solar. Available at http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=3050421&contentId=7028816. Accessed 2009 July 20.
5. Cleveland CJ. 2006. The encyclopedia of earth. Mouchout, Auguste. Available at http://www.eoearth.org/article/Mouchout,_Auguste. Accessed 2010 Nov 9.
6. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov/. Accessed 2009 Sept 10.
7. Wikipedia. Augustin-Jean Fresnel. Available at http://en.wikipedia.org/. Accessed 2009 Oct 9.
8. Carlson DE, Wronski CR. Amorphous silicon solar cells. Applied Physics Letters 1976; 28: 671–673.
9. Markvart T, Castaner L. Practical handbook of photovoltaics, fundamentals and applications. Amsterdam: Elsevier; 2003.
10. Georgia State University. The doping of semiconductors. Available at http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/dope.html. Accessed 2010 Nov 26.
11. Energie Solar. Homepage. Available at http://www.energiesolar.com/energie/html/index.htm. Accessed 2010 Nov 26.
12. American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial. ASTM Standards and Digital Library. Available at http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/index.shtml. Accessed 2010 Nov 26.
13. Nourai A. Large-scale electricity storage technologies for energy management. In: Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 1. Piscataway, NJ: IEEE; 2002. p 310–315.
14. Song C, Zhang J, Sharif H, Alahmad M. A novel design of adaptive reconfigurable multicell battery for poweraware embedded network sensing systems. In: Proceedings of Globecom. Piscataway, NJ: IEEE; 2007. p 1043–1047.
15. U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory. Available at http://www.nrel.gov/. Accessed 2010 Oct 10.
16. Siemens. Photovoltaic power plants. Available at http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/renewables/solar-power/photovoltaic-power-plants.htm. Accessed 2010 Oct 10.
17. Gow JA, Manning CM. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies in electric power application. In: IEEE Proceedings. Vol. 146. Piscataway, NJ: IEEE; 1999. p 193–200.
18. Esram T, Chapman PL. Comparison of photovoltaic array maximum power

point tracking techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion 2007; 22(2):439–449.

19. Sera D, Teodorescu R, Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ: IEEE; 2007. p 2392–2396.
20. Quaschning V. Understanding renewable energy systems. Available at http://theebooksbay.com/ebook/understanding-renewable-energy-systems/. Accessed 2009 Dec 20.

补充文献

Alahmad M, Hess HL. Reconfigurable topology for JPLs recharge able micro-scale batteries. Paper presented at: 12th NASA Symposium on VLSI Design; Oct 4–5, 2005; Coeur dAlene, ID.

Alahmad MA, Hess HL. Evaluation and analysis of a new solid-state rechargeable microscale lithium battery. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008; 55(9): 3391–3401.

ASTM International. Homepage. Available at http://www.astm.org/

Burke A. Energy storage in advanced vehicle systems. 2005. Available at http://gcep.stanford.edu/pdfs/ChEHeXOTnf3dHH5qjYRXMA/14_Burke_10_12_trans.pdf

Chan D, Phang J. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. IEEE Transactions on Electronic Devices 1987; 34(2):286–293.

Davis A, Salameh ZM, Eaves SS. Evaluation of lithium-ion synergetic battery pack as battery charger. IEEE Transactions on Energy Conversion 1999; 14(3):830–835.

Delta Energy Systems. ESI 48/120V Inverter specifications. Available at http://www.delta.com.tw/product/ps/tps/us/download/ESI%20120V%20Inverter.pdf

Dzimano G. Modeling of photovoltaic systems [master's thesis]. Columbus: The Ohio State University; 2008.

Hahnsang K. On dynamic reconfiguration of a large-scale battery system. In: Proceedings of the 15th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Piscataway, NJ: IEEE; 2009.

International Energy Agency. 2009. Trends in photovoltaic applications, survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008. Report IEA-PVPS Task 1 IEA PVPS T1-18:2009. Available at http://www.ieapvps.org/products/download/rep1_18.pdf

Maui Solar Software. Homepage. Available at http://www.mauisolarsoftware.com.

National Renewable Energy Laboratory. Renewable Resource Data Center. Solar radiation for flat-rate collectors—Ohio. Available at http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/redbook/PDFs/OH.PDF

Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ: IEEE; 2007.

Sandia National Laboratories. Photovoltaic research and development. Available at http://photovoltaics.sandia.gov

Siemens. Solar inverter systems. Available at http://www.automation.siemens.com/photovoltaik/sinvert/html_76/referenzen/

Taymur E. Photovoltaics systems sizing [master's thesis]. Columbus: The Ohio State University; 2009.

U.S. Department of Energy. Solar Energies Technologies Program. Available at http://www1.eere.energy.gov/solar/

U.S. General Services Administration. Homepage. Available at http://www.gsa.gov/

第 6 章　风能微电网系统

6.1　引言

历史学家估计，早在公元前 3200 年风能便被用于船舶航行[1]。伊朗（波斯）开发了第一个用于提水和研磨谷物的风车[1]。1891 年丹麦研制了第一台用于发电的风电机组[2]。现在丹麦超过 20% 的电力来自风能，丹麦风电产业占全球市场的比重为 27%。

捕获的风能由机械能利用法拉第感应定律的经典过程转换为电能[3]。

图 6-1 为美国能源部（Department of Energy，DOE）发布的 2004～2009 年按照资源分类的能源消耗分布图[4,5]。

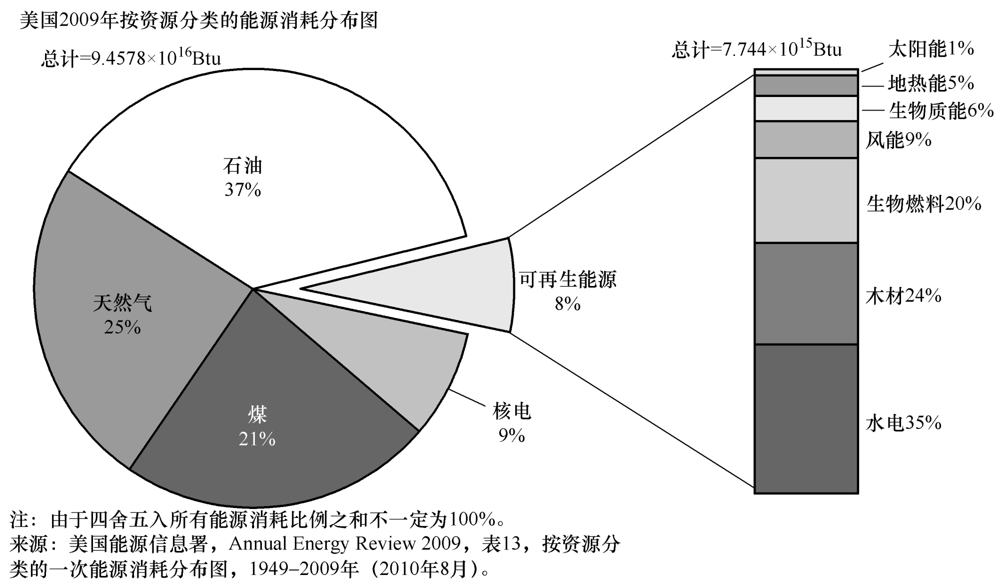


图 6-1　美国 2004～2009 年按资源划分的能源消耗[7]

虽然可再生能源发电量仍处于较低水平，但 2000 年以后美国的可再生能源（不包括水电）发电量已经增长了近 3 倍。2009 年，美国大约 10% 的电力来自可再生能源（http：//www. eia. doe. gov/energyexplained/index. cfm？page = renewable_home）。

美国能源部下属的国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laborato-

ry，NREL）致力于可再生能源的研究、开发、推广及规划。NREL 提供美国各个区域的风资源数据；位于不同地理区域的读者可访问 NREL 的网页获取所属区域的风电数据。

6.2 风力发电

风能是储量最丰富的能源之一[7-15]，也是全球范围内发展速度最快的可再生能源，如图 6-2 所示。通过改进机组和变换器的设计，风力发电成本显著降低，从 1980 年的 37 美分/kWh 降至 2008 年的 4 美分/kWh。2008 年，全球风力发电量为 331.6TWh，占全球总发电量的 1.6%，仅次于水电（16.6%），居第二位㊀。而光伏发电占全球总发电量的比例仅为 0.1%。

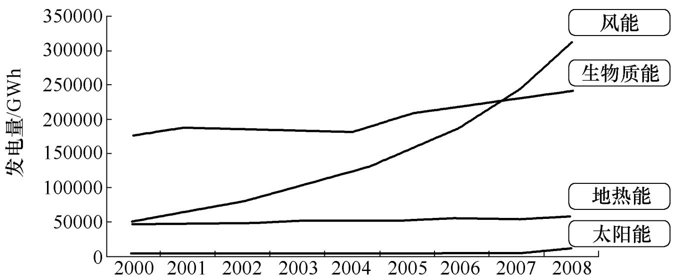


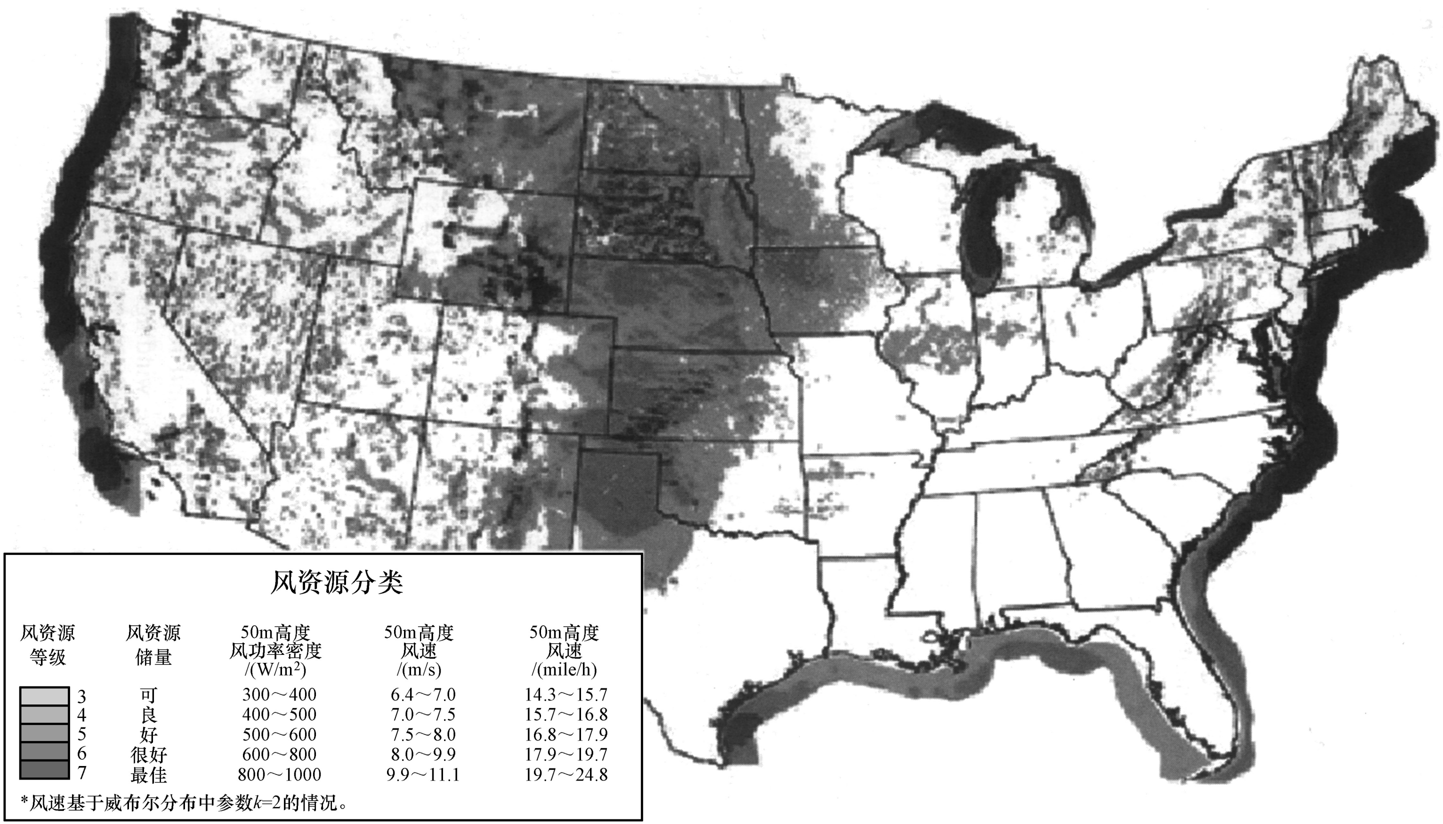
图 6-2　2000~2008 年全球风能、生物质能、地热能和太阳能的发电量[4]

仅美国陆上适于开发的风资源便超过 8000GW，另外还有 2000GW 的近海风资源。2008 年美国风电总装机容量为 1109GW，与之相比，美国未开发的风资源规模大概是它的 8 倍。

全球范围内风况的变化受地球自转和太阳辐照及受热的季节性变化的影响。陆地和海洋受热的差异及地形变化，比如山脉和山谷，可以影响局部地区的风况。风况通常由风速和风向两个参数描述。风速利用风速计测定，可以通过测量风速计旋转的角速度并加以转换得到对应的风的线速度，风速单位为 m/s 或 mile/h。特定位置的风能储量取决于平均风速。首先记录 1 年时间内的风速测量数据，然后将其与邻近位置的可用长期风速测量数据进行比较进行风速和场地的风能储量预测。

图 6-3a 为 NREL 发布的美国毗连区域风资源分布图[9]。此图根据各地区的年平均风速和 60m（164ft）塔筒高度的风功率密度得出，它可用于场地初始评估。沿海地区风能储量高，然而美国 90% 的可利用风资源位于 11 个大草原州[9] 的风带上。

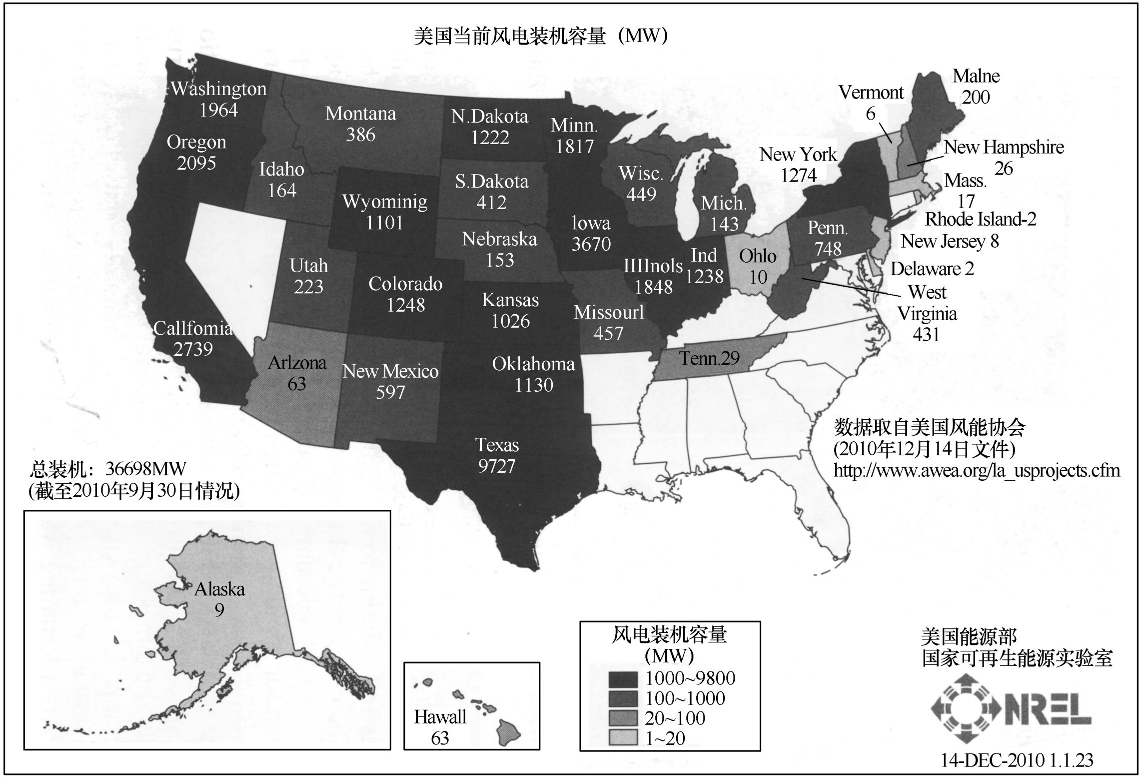
㊀ 译者注：这里指居可再生能源发电量的第二位，化石燃料发电和核电未包括在内。



a)

图 6-3

a）美国按地区分类的风资源图[6]



b)

图 6-3（续）

b）截至 2009 年美国的风电装机情况（http：//www. windpoweringamerica. gov/pdfs/wind_maps/installed_capacity_current. pdf）.

至2009年9月30日，美国风电总装机容量为36698MW（http：//www. windpoweringamerica. gov/pdfs/wind_maps/installed_capacity_current. pdf）。水平轴风电机组由以下子系统组成（见图6-4）：

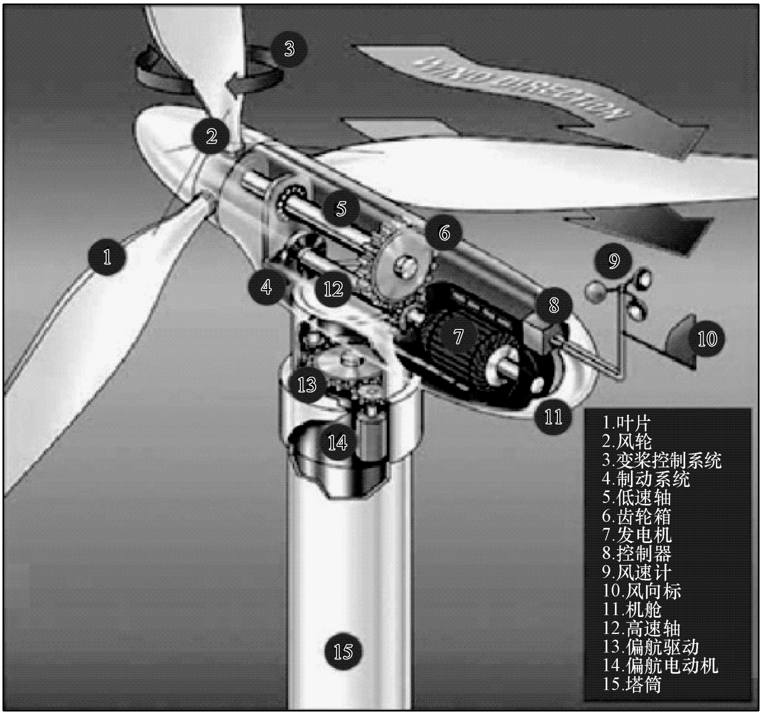


图6-4 风电机组系统（图片来自美国国家可再生能源实验室）[7-9]

1）叶片：两个或三个叶片安装在风电机组轮毂的（风轮）轴上；它们由高密度环氧树脂或玻璃纤维复合材料制成。风在与叶片垂直的方向上产生阻力，并在与叶片一致的方向产生升力使风轮转动。叶片的横截面设计成在不同风速下可以尽可能降低阻力而增加升力的形状，从而提高机组的输出功率。

2）风轮：风轮转换风的机械能，并为发电机提供动力。

3）变桨控制系统采用电动机或液压机构。它用来转动叶片（即改变桨距）使风机捕获的功率最大化或在高风速时降低风轮转速。

4）风轮制动系统用于维修时阻止风轮旋转。当风电机组输出功率太低或太高时，某些先进的机组在切入风速及切除风速附近采用液压制动系统。

5）低速轴用于将转速在30～60r/min的风轮上的机械功率传导至齿轮箱。

6）齿轮箱用来连接低速轴和高速轴，并将转速提升至发电机适用的1200～1600r/min。由于齿轮箱有产生噪声、成本高、摩擦损耗和维护复杂等缺点，因此

一些机组设计不使用齿轮箱。

7）适用于风电机组的感应式或永磁式发电机。

8）风控制器用于调整和控制机组的电气及机械运行。

9）风速计用于测量风速，并将测量信号发送至控制器。

10）风向标是一种用来指示风向的仪器。风向标用于确定风向并将风向信号发送至控制器，而控制器又在风向改变时命令偏航驱动系统，使风力机头锥对准正确方向。

11）机舱是用于放置机轴、发电机、控制器和风轮制动装置的防风雨、流线型密封舱。

12）高速轴用于齿轮箱和发电机转子间的机械连接。

13）偏航驱动利用偏航电动机或液压机构使机舱和风轮适应风向变化。

14）偏航电动机用于转动机舱及其内部部件。

15）塔筒用于抬高风机并支撑风轮叶片和机舱。机组塔筒一般为管状，高度大致与风轮直径相等；不过，为避免湍流影响，要求塔筒高度最低为26m。

附录D给出了评估风中蕴含的机械功率的简明方法。

6.3　风力发电机

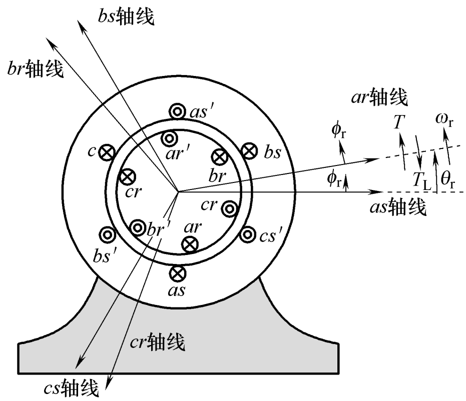
风力发电机（WTG）在技术和装机容量上都发展迅速[6]。多年来，带齿轮箱的常规风电机组系统占据了风电市场的主导地位。风电机组根据其速度特性可以分为定速和变速机组两类。

风电机组的转速通常比较低。一般风电机组用发电机可分为两类：绕线型转子绕组发电机和笼型感应发电机。这种系统采用与直接联网的定速笼型感应发电机（Squirrel Cage Induction Generator，SCIG）连接的多级齿轮系统。由笼型感应发电机（SCIG）组成的微电网系统如图6-6所示。

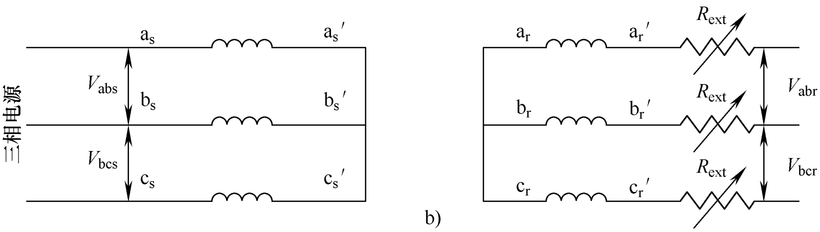
图6-5a为定子及转子绕组的分布图。图中定子绕组和转子绕组表示为集中分布。可是，实际上定子绕组和转子绕组为近似正弦分布式绕组。这些绕组的轴线相互之间相差120°。正弦分布的定子绕组角度用ϕ_s表示，而正弦分布的转子角度用ϕ_r表示。θ_r为转子绕气隙旋转时的转子角度。

当定子绕组励磁电流为对称的三相正弦电流时，每相绕组产生脉动正弦矢量磁场，磁场方向与绕组轴方向一致并指向图6-5a所示磁场幅值最大的地方。三相绕组矢量磁场分布等效于单相正弦矢量磁场分布。对于一台两极电机，如果定子绕组励磁电流源为60Hz，则两极矢量磁场的同步速为3600r/min。

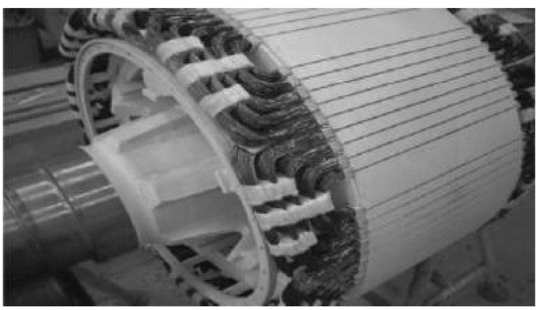
利用电力电子开关可平滑发电机并网及脱网时对电网的冲击，限制有害的、幅值约为1.6倍额定电流的冲击电流，从而实现发电机软启动。断路器可以由微控制器自动控制或手动控制。过零点是电压（电流）为零的瞬时点。在交流波形中，如



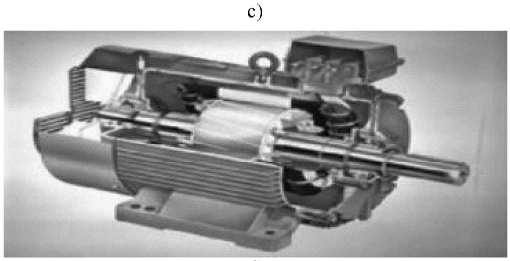
a)



b)



c)



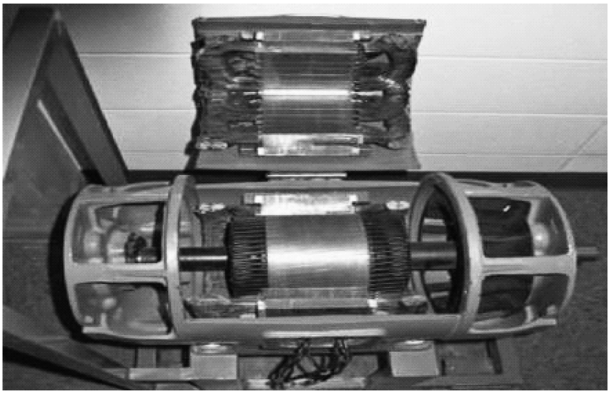
d)

图 6-5　感应电机类型

a）绕线型电机定子及转子绕组　b）等效电路图　c）绕线型转子绕组视图

d）笼型感应发电机（SCIG）剖视图

图 6-5c ~ d 得到 ABB 公司许可使用（http：//www. abb. com/product/us/9AAC133417. aspx）。



e)

图 6-5　感应电机类型（续）

e）笼型感应发电机视图

图 6-5c～e 得到 ABB 公司许可使用（http：//www. abb. com/product/us/9AAC133417. aspx）。

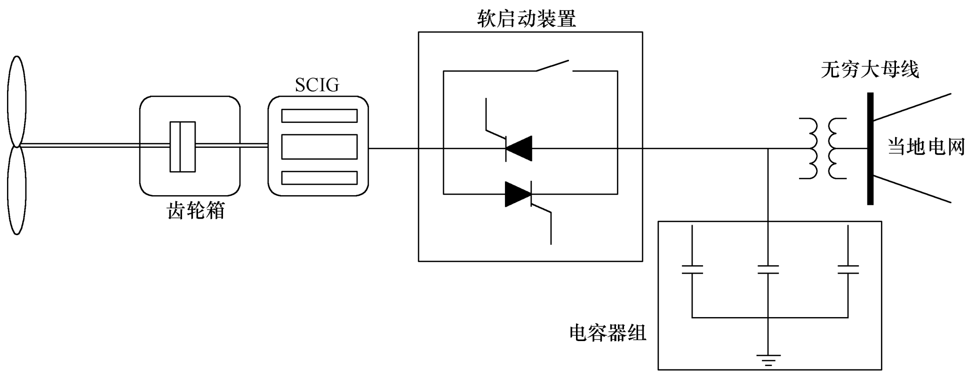


图 6-6　由笼型感应发电机（SCIG）组成的微电网系统示意图

图 6-7 所示，一个周波内一般有两个过零点。假设系统以滞后功率因数运行，比如 0. 86 滞后功率因数，则电流滞后于电压，如图 6-7 所示。

软启动断路器可以由微控制器或数字信号处理器控制。软启动断路器在电压过零点闭合，在电流过零点断开。软启动开关还可以保护机组的机械部件如齿轮箱及轴承避免因受大的冲击力而损伤。感应电机在同步转速以上运行 2s 后，软启动开关利用可控晶闸管将电网在其正弦电压过零点与感应发电机相连㊀。

㊀ 译者注：原文误为“发电机”与“感应发电机相连”。

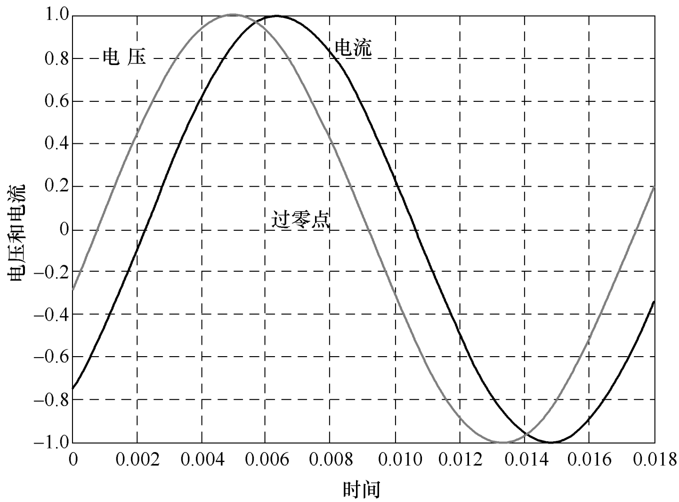


图 6-7　交流电源以 0.86 滞后功率因数供电时的过零点

6.4　感应电机建模

对于绕线型转子的三相圆形感应电机，其定子由三相绕组组成。转子绕组也由三相绕线绕组组成。笼型感应电机的转子没有绕线绕组，而是有一个通常由铝铸造的笼子。

对于电机的稳态数学建模，假定定子绕组和转子绕组是三相平衡的[17,18]。对于笼型感应电机的情况，假定转子用一个等效绕组表示。设计时各相定子绕组采用的导线线径相同且在电机定子中占据相等空间。这种做法同样适用于转子绕组。为理解流过绕组的电流与产生的磁场分布之间的关系，需要知晓电机定子、转子和电机气隙中磁场分布的关系。首先回顾一下图 6-8 所示矩形结构线圈的磁场分布的基本原则。这些内容有助于理解电感和感应现象的基本概念，这些概念将在本章以后内容中用到。

根据电磁学的基本原理，磁场强度用符号 H 表示，单位为 A/m，磁场强度与磁心长度的乘积等于线圈匝数 N 与流过绕组的电流 I 的乘积，即

$$Hl = NI \tag{6-1}$$

磁场强度 H 和磁通密度 B（单位为 Wb/m^2,）以及铁磁材料磁导率 μ 之间的基本关系可表示为

$$H = \frac{B}{\mu} \tag{6-2}$$

式中，$\mu = \mu_r\mu_0$；$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m，μ_r 为相对磁导率。例如，空气的相对磁导率为 1，而铁的相对磁导率在 26000 ~ 360000 之间。因此，μ 是 $B = \mu H$ 的斜率，其中 H 为磁场强度。磁力线分布在图 6-8 所示矩形结构内，磁通等于磁通密度和铁心截

面积 A 的乘积，即

$$\Phi = BA \tag{6-3}$$

磁通 Φ 代表链接绕组的磁力线，单位为韦伯（Wb）。漏磁通 Φ_1 代表在周围介质而不是在铁心结构中的分散磁力线。

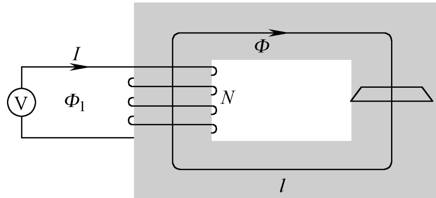


图 6-8　一个电感器绕组

如果假定漏磁通为零，则磁场强度 H 与铁心平均长度的乘积等于磁动势（magnetomotive force，mmf），如式（6-4）所示。

$$Hl = mmf \tag{6-4}$$

因此，磁动势等于绕组匝数与流过绕组的电流的乘积 NI，此磁动势产生的磁通与磁场强度为 H 的情况相同。

将磁场强度 H 代入式（6-4），可以得到定子、转子和气隙内的磁通如下：

$$\Phi \cdot \frac{l}{\mu \cdot A} = mmf \tag{6-5}$$

$$\Re = \frac{l}{\mu \cdot A} \tag{6-6}$$

式（6-6）给出了磁阻 $\Re$的定义。磁阻性质与电阻类似。它与磁通经过的介质尺寸有关。

$$\Phi \cdot \Re = mmf \tag{6-7}$$

磁阻与电感成反比，而电感与绕组匝数的二次方成正比。L 表示图 6-8 中所示线圈的电感。

$$L = \frac{N^2}{\Re} \text{或} L = \mu \frac{N^2 A}{l} \tag{6-8}$$

为理解磁导率，需要了解磁滞现象。磁滞回线反映被试验铁磁材料的磁化特性。磁滞回线显示了铁心由铁磁材料制成的绕组的外施电压与流过绕组的电流之间的关系。感应产生的磁通密度（B）用外施电压、磁场强度（H）和绕组中流过的电流计算。它通常称为 B-H 曲线。图 6-9 为磁滞回线示意图。磁滞回线通过测量外部电压变化时铁磁材料的磁通得到。

随着外施电压增加，先前未被磁化的铁心材料沿着图 6-9 所示虚线受磁，导致电流和磁场强度 H 增大。外施励磁电流越大，产生的磁场强度越大，H^+，磁通密度也更大，B^+。然而对于 a 点，外施电压增大时产生的磁通不一定随之增加。a 点位置取决于铁磁材料的类型。如图 6-9 所示，在磁饱和点处开始反向过程（即降低外施电压），记录的电压和电流反映磁通密度和磁场强度从 a 点移动至 b 点。在该点，即使外施电压降低至零，铁磁材料中仍有残留磁通。这一点称作磁滞回线的剩磁，它反映了铁磁材料的剩磁（顽磁）特性。当外施电压的方向改变时，记录的磁通密度和磁场强度移动至 c 点。在这一点，磁通减小至零。它被称为磁滞回线的矫顽点。当外施

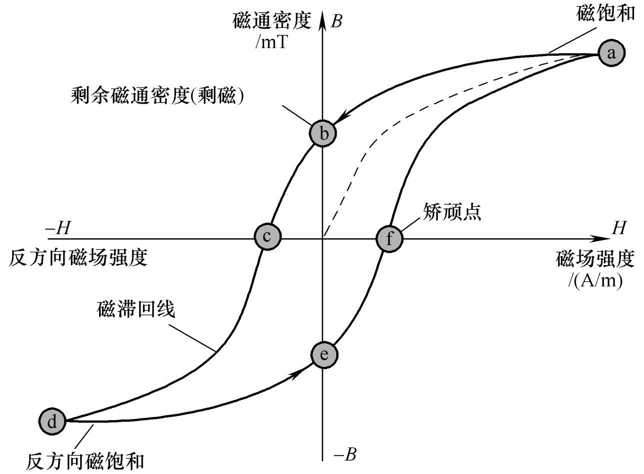


图 6-9　磁滞回线示意图[19]

电压的方向为反方向时，铁磁材料在反方向上磁饱和，进而达到 d 点。当外施电压再在正方向上增加并达到一定值时，磁场强度 H 越过零点，磁滞曲线到达 e 点。如果外施电压继续增加，磁场强度 H 在正方向上继续增加，磁场密度 B 回到零点。如果外施电压重复相同的循环，则上述过程重复进行。但如果上述过程反向进行，磁滞回线不会回到初始位置。去除残磁和铁磁材料磁化都需要外部作用力[19]。

图 6-10 所示为绕组外施电压变化时磁滞回线族的轨迹。如果将磁滞回线的顶点，A、B、C 点连接起来就得到正常磁化曲线。

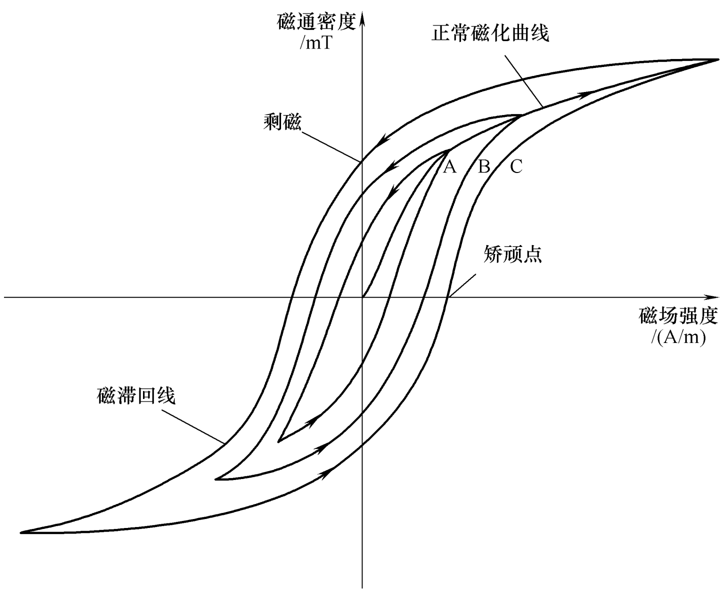


图 6-10　绕组外施电压变化时的磁滞回线族示意图[19]

由于 $B=\mu H$，因此如式（6-9）所示，磁导率 μ 是磁滞回线的斜率。

$$\mu=\frac{B}{H} \tag{6-9}$$

在磁化曲线的线性区域，根据式（6-8），电感呈线性。图 6-12 所示为铁心饱和时矩形铁心的电感变化情况。

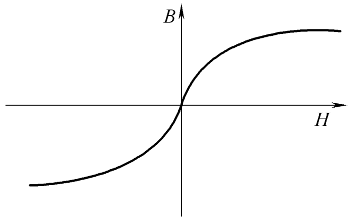


图 6-11　正常磁化曲线

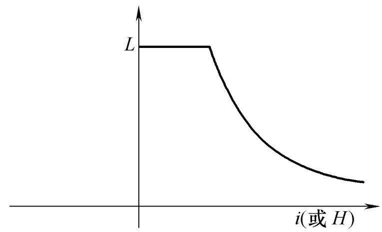


图 6-12　铁心磁饱和时电感变化示意图

图 6-8 所示为一个简单矩形构件。不过，如图 6-5b 所示，一台三相感应电机的定子和转子中各有 3 个绕组。定子的 3 个绕组环绕定子周长布置，相互间隔 120°。转子的 3 个绕组环绕转子周长布置，相互同样间隔 120°。作为电动机运行时，定子由三相交流电源供电。时变交流电源对定子励磁，并在每相定子绕组中产生时变磁通密度和电感。尽管计算圆柱形结构的电感更加复杂，但采用高级有限元法并构建定子结构的离散元件可以计算这些元件中的磁通情况。不过，有限元法属于更复杂的课题，本书将不涉及。根据对电感器的研究，可以推断定子的电感与直径、绕组匝数、定子材料的磁导率、截面积和励磁电流有关。因此，由交流电源励磁的 a-a′绕组的磁通密度可以表示为

$$B_a(\theta_r,\ t)=B(t)\cos\left(\frac{p}{D}\theta_r\right) \tag{6-10}$$ ㊀

式中，$B(t)$ 是由外施的 a 相电压 $v_a(t)$ 产生的时变磁通密度：

$$B(t)=B_{max}\cos\omega_s t \tag{6-11}$$

式中，$\omega_s=2\pi f$ 是电源角频率，θ_r 为环绕定子周长的角度；p 为极数；D 为直径，$\frac{p}{D}\theta_r$角度的单位为弧度（rad）。

例如，当 $\theta_r=0$ 时 $B_a(x,\ t)=B_{max}$。

而且 $\theta_r=\frac{2\pi D}{p}$，式（6-10）可以改写为

$$B_a(x,t)=B(t)\cos\left(\frac{p}{D}\frac{2\pi D}{p}\right)=B_{max} \tag{6-12}$$

㊀ 译者注：原书此章电机极数用大写 P 表示，与表示功率的大写 P 混同，所以都统一改为以小写 p 表示。

将式（6-12）代入式（6-10），可得到式（6-13）。

$$B_{a}(x,t)=\hat{B}\cos\omega_{s}t\cos\left(\frac{p}{D}\theta_{r}\right) \tag{6-13}$$

对式（6-13）使用余弦公式，可得到式（6-14）。

$$\cos\alpha\cos\beta=\frac{1}{2}[\cos(\alpha-\beta)+\cos(\alpha+\beta)]$$

$$B_{a}(x,t)=\frac{\hat{B}}{2}\cos\left(\frac{p\theta_{r}}{D}-\omega_{s}t\right)+\frac{\hat{B}}{2}\cos\left(\frac{p\theta_{r}}{D}+\omega_{s}t\right) \tag{6-14}$$

对于绕组 b-b′和 c-c′可以得到如式（6-15）和式（6-16）所示的相同表达式。

$$B_{b}(x,t)=\hat{B}\cos\left(\omega_{s}t-\frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\frac{p\theta_{r}}{D}-\frac{2\pi}{3}\right) \tag{6-15}$$

$$B_{c}(x,t)=\hat{B}\cos\left(\omega_{s}t-\frac{4\pi}{3}\right)\cos\left(\frac{p\theta_{r}}{D}-\frac{4\pi}{3}\right) \tag{6-16}$$

考虑到磁通密度为矢量，可以将 a 相、b 相和 c 相产生的磁通密度叠加，进而得到如式（6-17）所示三相电路产生的总磁通。

$$B_{tot}(x,t)=B_{a}(\theta_{r},t)+B_{b}(\theta_{r},t)+B_{c}(\theta_{r},t) \tag{6-17}$$

$$B_{tot}(x,t)=\frac{3}{2}\hat{B}\cos\left(\frac{p\theta_{r}}{D}-\omega_{s}t\right) \tag{6-18}$$

式（6-19）给出了电机气隙内部磁通密度的峰值。

$$B_{tot}=\frac{3}{2}\hat{B} \tag{6-19}$$

转子绕组分布在转子结构内。定子绕组流过气隙的时变总磁通密度将转子绕组链接起来，在转子绕组中产生感应电压。下面分析两种情况下转子感应电压的情况：电机停转；电机空转。

1. 电机停转

B_{tot}（θ_{r}，t）为电机中的总磁通分布，磁通线的频率为

$$\omega_{s}=2\pi\cdot f_{s} \tag{6-20}$$

$$f_{s}=\text{定子频率}$$

此磁通分布可视为在电机气隙内分布的磁力线，其等效机械转速为

$$\omega_{mech(\text{等效})}=\frac{2}{p}\cdot\omega_{s} \tag{6-21}$$

式（6-21）所示机械转速也称为同步转速。

$$\omega_{syn}=\frac{2}{p}\cdot\omega_{s} \tag{6-22}$$

短接转子绕组并假定转子受限制而保持静止。则定子内的磁力线分布会穿过电机气隙与转子绕组链接，在转子绕组的 a、b、c 相感应出电压。在转子绕组中产生的电流会在转子绕组中产生转子磁通。把转子绕组 a、b、c 相产生的磁通相加，

可得

$$B_R(x,t) = B_{aR}(x,t) + B_{bR}(x,t) + B_{cR}(x,t) \\ = \frac{3}{2}\hat{B}\cos\left(\frac{p\theta_r}{D} - \omega_{stator}t\right) \tag{6-23}$$

由于电机停转，电机转速为零，因此转子频率与定子频率相同。事实上，此时感应电机的运行与一台三相变压器类似；不过，在支撑齿轮系统并将定子和转子用很小的气隙隔离起来的转子圆柱形结构内，定子和转子绕组相互耦合。

2. 电机空转

假设电机转子空转。令转子转速为 ω_m，则转子总磁通分布 $B_R(x, t)$ 的机械转速如式（6-24）所示：

$$\omega_{r(mech)} = \omega_{syn} - \omega_m \tag{6-24}$$

式中，$\omega_{r(mech)}$ 为转子机械转速。由于电机空转，其数值等于同步转速与电机主轴转速之间的差值。转子磁通的电气转速如式（6-25）所示。

$$\omega_r = \frac{p}{2}\omega_{r(mech)} = \frac{p}{2}(\omega_{syn} - \omega_m) \tag{6-25}$$

$$\omega_r = 2\pi f_r$$

式中，f_r 为转子感应电压（电流）的频率。

定子磁通的总磁通分布 $B_s(\theta_r, t)$ 的等效机械转速为 ω_{syn}。两极电机的定子磁通分布如图 6-13 所示。相对于转子，两极电机转子的总磁通分布 $B_R(\theta_r, t)$ 对应的转子转速为 $\omega_{syn} - \omega_m$；相对于定子，两极电机转子的总磁通分布 $B_R(\theta_r, t)$ 对应的转子转速为 ω_m（机械转速）。

如图 6-13 所示，电机的两个磁通之间有一个角度差。作为电动机运行时，ω_{syn}和 ω_m 旋转方向一致且 $\omega_{syn} > \omega_m$。

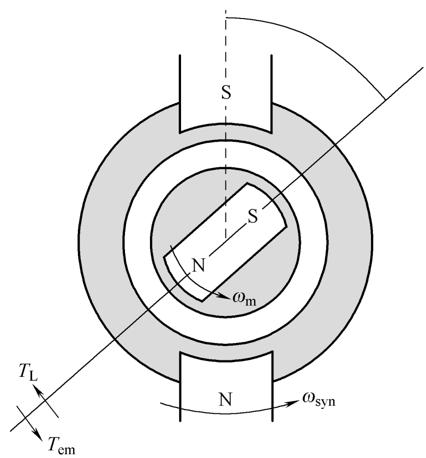


图 6-13　两极电机磁通分布示意图

6.4.1　计算转差率

$$\omega_r = \frac{p}{2}(\omega_{syn} - \omega_m) \tag{6-26}$$

先乘以 ω_{syn}（定子电气转速）再除以 ω_{syn}，得

$$\omega_r = \frac{\omega_{syn} - \omega_m}{\frac{2}{p}\omega_{syn}}\omega_{syn} \tag{6-27}$$

定义

$$s = \frac{\omega_{syn} - \omega_m}{\omega_{syn}} = \text{转差率} \tag{6-28}$$

$$\omega_r = s\omega_{syn} \text{即} f_r = sf \tag{6-29}$$

式中，ω_{syn}和ω_m的单位为 rad/s。转差率可根据式（6-30）计算得到。

$$s = \frac{n_{syn} - n_m}{n_{syn}} \tag{6-30}$$

$$n_{syn} = \frac{120 f_s}{p} \tag{6-31}$$

式中，n_{syn}为同步转速（r/min），n_m 为转子转速（r/min）。

6.4.2　感应电机等效电路

图 6-14 所示为一台三相Y联结定子和转子绕组。当电机作为电动机运行时，定子与三相电源直接相连或通过频率可变的 PWM 变换器相连。转子短接或外接电阻。作为电动机运行时，电机转速低于同步转速，电机用于承载机械载荷。而作为风力发电机运行时，机械能由风提供，发电机转速高于同步转速。为研究电机运行过程，需要建立电机的等效电路模型。在图 6-16 中，定子绕组用下标“1”表示，转子绕组用下标“2”表示。下面对两种运行状况进行分析：电机停转；电机空转。

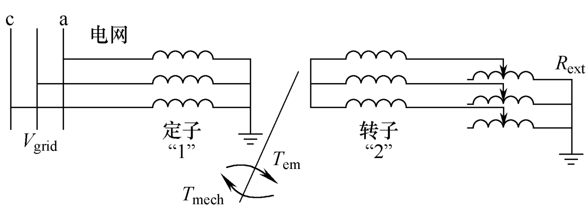


图 6-14　转子电路中带外接电阻 R_{ext}的绕线转子型感应电机等效电路

1. 电机停转

假定电机停转，机轴转速为零（$\omega_m = 0$）。利用绕组解耦建模时使用的方法，可以得到图 6-15 所示单相对地等效电路图。

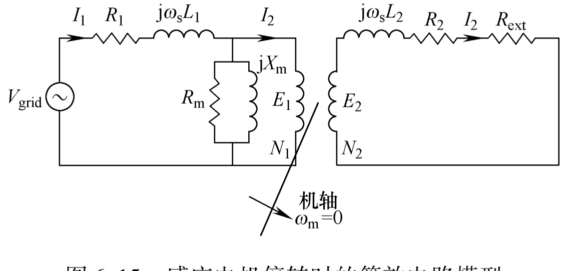


图 6-15　感应电机停转时的等效电路模型

电机设计使用的励磁电流值很小。通常情况下，励磁电流不到额定负载电流的5%。这要求作为净励磁阻抗的励磁电抗 X_m 和电阻 R_m 起大阻抗的作用。因此可以忽略并联元件。在这种情况下，可以得到以下表达式：

$$I_1 = I'_2 \tag{6-32}$$

$$\tilde{V}_{grid} = \tilde{I}_1(R_1 + j\omega_s L_1) + \tilde{E}_1 \tag{6-33}$$

$$\tilde{E}_2 = \tilde{I}_2(R_2 + R_{ext} + j\omega_s L_2) \tag{6-34}$$

2. 电机空转

假定电机转速为 ω_m。转子电阻表示为 $R_2 = R_{2,rotor} + R_{ext}$

$$\tilde{V}_{grid} = \tilde{I}_1(R_1 + jX_1) + \tilde{E}_1 \tag{6-35}$$

$$\tilde{E}_2 = \tilde{I}_2(R_2 + j\omega_r L_2) \tag{6-36}$$

式中，R_1 为每相的定子电阻，$X_1 = \omega_s L_1$ 为每相的定子电抗，I_1 为定子电流（线电流），E_1 为每相的感应电动势。

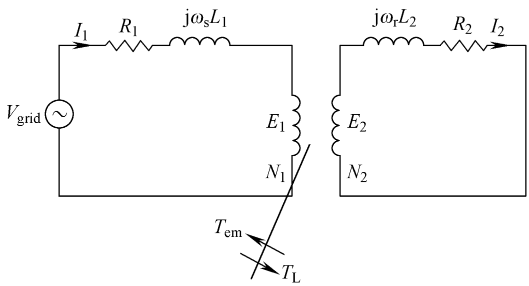


图 6-16 感应电机空转时的等效电路模型

令

$$a = \frac{N_1}{N_2} \tag{6-37}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \tag{6-38}$$

根据法拉第感应定律，感应电压 e_1 和 e_2 的表达式如下：

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \Phi_{max} \cos(\omega t + \theta_1) \tag{6-39}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = sN_2 \Phi_{max} \cos(\omega t + \theta_2) \tag{6-40}$$

则 E_1 和 E_2 的方均根值可表示为

$$E_1 = \frac{N_1 \Phi_{max}}{\sqrt{2}}, E_2 = \frac{sN_2 \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \tag{6-41}$$

E_1 和 E_2 之比为

$$E_2 = sN_2\frac{E_1}{N_1} = s\,\frac{E_1}{a} \tag{6-42}$$

I_2 和 I_1 之间的关系可以表示为

$$\tilde{I}_2 = a\tilde{I}_1 \tag{6-43}$$

利用上述关系，可以将转子侧的变量折算至定子侧，进而得到折算至定子侧的感应电机等效电路模型。

$$\tilde{E}_2 = \tilde{I}_2(R_2 + \mathrm{j}\omega_r L_2) \tag{6-44}$$

$$s\,\frac{\tilde{E}_1}{a} = a\tilde{I}_1(R_2 + \mathrm{j}\omega_r L_2) \tag{6-45}$$

式（6-45）[㊀]乘以 a 再除以 s，可得

$$s\tilde{E}_1 = \tilde{I}_1(a^2R_2 + \mathrm{j}sa^2X_2) \tag{6-46}$$

$$\tilde{E}_1 = \tilde{I}_1\left(\frac{a^2R_2}{s} + \mathrm{j}a^2X_2\right) \tag{6-47}$$

式（6-47）表示了折算至定子侧的转子电路变量。式（6-48）给出了定子一相电路的变量。

$$\tilde{V}_{grid} = \tilde{I}_1(R_1 + \mathrm{j}X_1) + \tilde{E}_1 \tag{6-48}$$

将式（6-47）代入式（6-48），可得

$$\tilde{V}_{grid} = \tilde{I}_1(R_1 + \mathrm{j}X_1) + \tilde{I}_1\left(a^2\frac{R_2}{s} + \mathrm{j}a^2X_2\right) \tag{6-49}$$

根据式（6-50）中的变量定义改写式（6-49）：

$$R'_2 = a^2R_2 \quad X'_2 = a^2X_2 \tag{6-50}$$

$$\tilde{V}_{grid} = \tilde{I}_1\left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + \mathrm{j}(X_1 + X'_2)\right] \tag{6-51}$$

图 6-17 和图 6-18 给出了折算至定子侧的感应电机等效电路图。

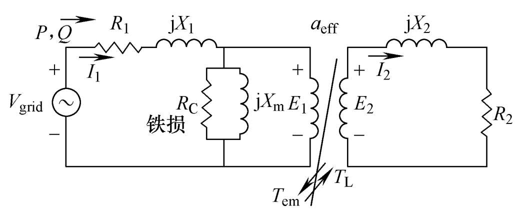


图 6-17　励磁电感折算至定子侧的感应电机等效电路模型

㊀ 译者注：原文此处和后面误写了一些公式编号，译文中已直接改正，不再一一标出。

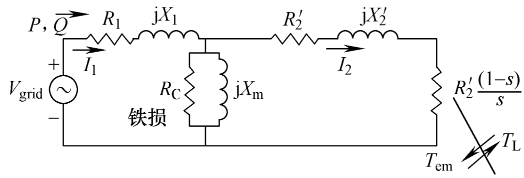


图 6-18　转子电路变量折算至定子侧的感应电机等效电路模型

6.5　感应电机潮流分析

如式（6-52）所示，输入功率可以由输入电压和流入电机的电流计算。

$$P_{\mathrm{i}}=3\mathrm{Re}\{V_1 I_1^*\} \tag{6-52}$$

穿过电机气隙（见图 6-17 或图 6-18）的功率可以由输入功率减去定子导线电阻损耗和铁心损耗得到，如式（6-53）所示。

$$P_{\mathrm{AG}}=3P_{\mathrm{i}}-3(I_1^2R_1+P_{\mathrm{c}})=3|I_2|^2\frac{R'_2}{s} \tag{6-53}$$

式中，P_{c} 为图 6-18 中等效电阻 R_{c} 产生的铁心损耗。

从式（6-53）可看出，气隙功率也可以由转子电流 I_2 的二次方和$\frac{R'_2}{s}$计算得到。

当电机以电动机模式运行时，传送至机轴的功率可以去除转子损耗后得到。

$$P_{\mathrm{em}}=P_{\mathrm{AG}}-3I_2^2R'_2 \tag{6-54}$$

将气隙功率代入式（6-54），可以得到式（6-55）。

$$P_{\mathrm{em}}=3I'^2_2\frac{R'_2}{s}-3I'^2_2R'_2=3I'^2_2\left(\frac{R'_2}{s}-R'_2\right) \tag{6-55}$$

$$P_{\mathrm{conv}}=P_{\mathrm{em}}=3I'^2_2R'_2\left(\frac{1-s}{s}\right) \tag{6-56}$$

因此，传送至机轴的电磁功率可以表示为气隙功率的函数，如式（6-57）所示。

$$P_{\mathrm{em}}=3I'^2_2\frac{R'_2}{s}(1-s)=P_{\mathrm{AG}}(1-s) \tag{6-57}$$

图 6-19 为功率从定子流向电机机轴的潮流分布图。潮流分布包括输入功率 P_{i}、气隙功率 P_{AG}、电磁功率 P_{em} 以及传递至机轴的输出功率 P_{o}。

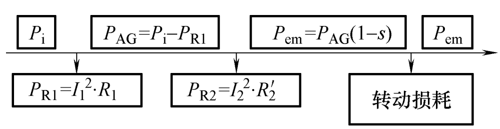


图 6-19　感应电机潮流

感应电机有 3 种运行状态：电动机、发电机及电磁制动。为说明这些运行区域，需要研究电机转矩与转速之间的关系。

利用式（6-58）以及图 6-20 所示的电机模型，首先需要计算电机转矩与输入电压之间的关系。

$$P_{em} = T_{em}\omega_m \tag{6-58}$$

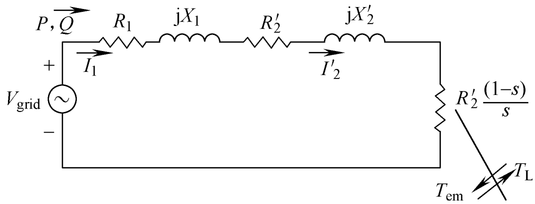


图 6-20　以电动机状态运行的感应电机，从定子端子看去的等效电路图，忽略励磁部件

式（6-58）中，ω_m 为机轴转速，T_{em} 为驱动主轴的转矩，P_{em} 为供给电机的功率。P_{em} 可以通过电网流入电机的电流计算。由于忽略了励磁部件，因此电流 I_1 等于 I'_2。

$$V_{grid} = I_1\{(R_1 + R_2) + j(X_1 + X'_2)\} \tag{6-59}$$

根据式（6-59），可以计算电流 I_1，如式（6-60）所示。

$$|I_1|^2 = \frac{|V_{grid}|^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \tag{6-60}$$

供给转子的转矩如式（6-61）所示。

$$T_{em} = \frac{3}{\omega_m}\left(\frac{1-s}{s}\right)R'_2|I_1|^2 \tag{6-61}$$

机轴转速也可以用式（6-62）表示。

$$\omega_m = \omega_{sync}(1-s) \tag{6-62}$$

将式（6-62）代入式（6-61），得到机轴转矩与输入电压之间的关系如式（6-63）所示。

$$T_{em} = \frac{3}{\omega_{sync}}\frac{R'_2}{s}\frac{|V_{grid}|^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \tag{6-63}$$

研究输入电压保持恒定的情况时，不同外接电阻阻值下的电机特性很有意义。认真研究式（6-63），可得出以下结论：

1）当转差率为 0 时，轴转速 ω_m 等于同步速 ω_{sync}，产生的电磁转矩为 0。

2）当转差率 s 等于 1，即机轴转速为 0（刚起动）时可得到停转转矩（起动转矩）。

3）如果用控制器调节外接电阻的阻值，最大转矩值对应的主轴转速将发生变化。

如果主轴转速可以控制在很宽范围内，则电机可以在不同的速度区间内运行。电机用作感应发电机时，可以捕获风能并将产生的功率注入当地电网。感应电机的不同运行状态如图 6-21 所示。

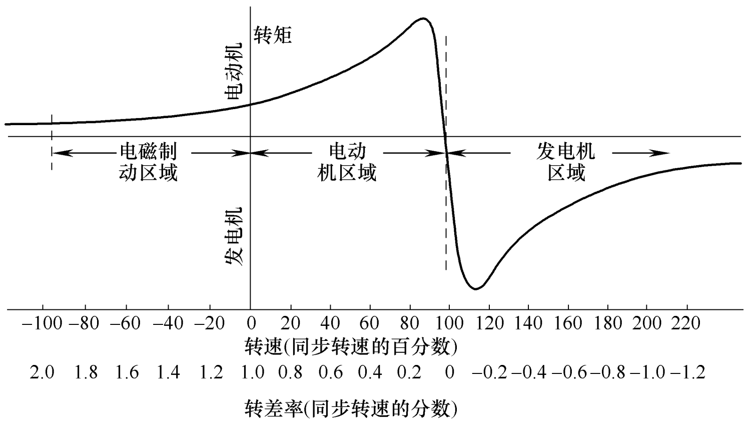


图 6-21　感应电机的不同运行状态

在感应电机转矩与转速关系曲线上有 3 个明显的特征点：①机轴转速为零时的起动转矩；②机轴转速等于磁通的同步转速时，产生的转矩为零（见图 6-21）；③最大转矩点。为计算最大转矩，需要确定式（6-63）中转矩表达式对转差率的导数，将其设定为零。

$$\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}s}=0 \tag{6-64}$$

式（6-65）给出了对应的最大转差率。

$$s_{\max}=\pm\frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2+(X_1+X'_2)^2}} \tag{6-65}$$

式（6-66）是计算得到的最大转矩。

$$T_{\max}=\pm\frac{3}{2\omega_{\mathrm{sync}}}\frac{|V_{\mathrm{grid}}|^2}{\left[R_1\pm\sqrt{R_1^2+(X_1+X'_2)^2}\right]} \tag{6-66}$$

式（6-65）表明，转矩最大时对应的转差率与转子电阻成正比。式（6-66）表明，最大转矩与转子电阻无关，但是与输入电压的二次方成正比。

6.6 感应发电机运行

绕线转子型感应电机的定子与笼型感应电机的定子类似。但它的转子的出线通

过集电环及电刷引出，用于转矩和转速控制。对于转矩控制，集电环上不施加功率。电机起动时外部电阻与转子绕组串联来限制起动电流。如果没有外部电阻，起动电流会是额定电流的数倍。取决于电机容量，起动电流可以达到满载电流的 3 ~9 倍。电机起动完成瞬间外部电阻短接。外部电阻也可用于控制电机转速和起动转矩。感应电机转差率为负值表示电机以发电机状态运行，发出的功率注入当地电网[20]。感应发电机转子励磁需要无功功率，需要的无功功率可通过以下两种方式提供：

1）电机励磁，在起动时作为电感使用。这时，风力机提供机械功率使电机转速增加至同步转速以上。电机独立运行时，可以使用感应电机并在机端并联电容器组，驱动电机使其转速增大超过同步转速，此时电机以感应发电机方式运行。电容器组有助于在转子导体产生感应电流，发出交流电流。由于电容器是并联的，因此负荷可以与电容器组接线相连接。只要转子绕组中存在剩磁，就可以用这种方法起动独立运行的电机。不过，电机也可以使用直流电源，如在极短时间内使用 12V 蓄电池励磁。

2）感应发电机的转子电阻可以通过快速电力电子控制器迅速调整。电机转速变化（从而使转差率变化）提供了在不同风速下增加从风中捕获功率的能力。如果转子绕组可以外接电阻，则通过发电机转子绕组相连的外接电阻，可以调整转差率。只有当风电机组的载荷增大时才使用外接电阻产生需要的转差率。

外接电阻和最大转矩及停转转矩的关系可以通过改变转子电路外接电阻阻值的方法进行研究。研究这种关系的 MATLAB M 文件见例 6.1。

风电机组风轮转动产生的功率通过传动链传递至发电机，传动链包括风力机主轴、齿轮箱和发电机高速轴。风速的正常范围并不太高，而且随时间、季节变化。例如，一台三相两极发电机可以与 60Hz 当地电网直联，运行转速为 3600r/min。如果电机极数增多，则电机转速可以降低。比如，如果电机极数分别为 4、6 或 8，则电机转速可以相应降低至 1800r/min、1200r/min 和 900r/min。由风电机组供电的电网需要更高的风速以使发电机运行在 900 ~3600r/min 转速范围内。为降低发电机转速，可以增加电机极数。不过，发电机极数增多会导致电机尺寸增大，进而使电机体积和重量增加。可以利用齿轮系统将风力机的低速、高转矩转换为高速、低转矩。在讨论齿轮概念之前，需要理解如何将线速度转化为角速度。感应发电机的等效电路如图 6-22 所示。

根据物理学基本原理，线速度和角速度之间的关系为

$$V = r \cdot \omega \tag{6-67}$$

式中，V 为线速度（m/s）；r 为半径（m）；ω 为角速度（rad/s）。

将角速度 ω 的单位换算为 r/min：

$$\omega = N\frac{2\pi}{60}$$

式中，N 为每分钟转数。式（6-67）可改写为

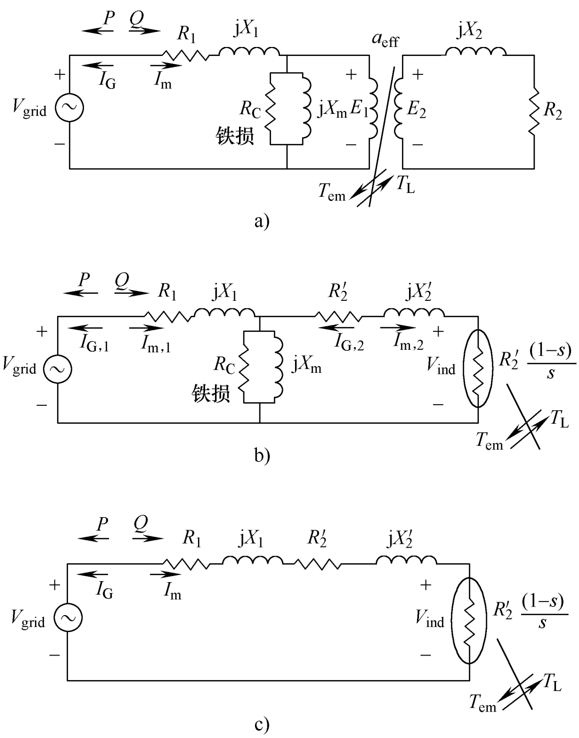


图 6-22
a）感应发电机等效电路 b）所有量折算至定子侧的感应发电机的等效电路
c）忽略励磁及损耗成分后折算至定子侧的感应发电机等效电路

$$V = N\frac{2\pi}{60}r \tag{6-68}$$

式中，V 的单位为 m/s，N 的单位为 r/min，r 的单位为 m。

可以再将上式改写为

$$N = V \cdot \frac{60}{2\pi \cdot r} \tag{6-69}$$

式中，V 的单位为 m/s，r 的单位为 m，N 的单位为 r/min。式（6-69）中 V 的单位也可以为 ft/s，r 的单位为 ft，N 的单位为 r/min。

如果速度以英里/时（mile/h）表示，则式（6-69）可改写为

$$\frac{5280}{3600}V = \frac{\pi r \cdot N}{30} \tag{6-70}$$

式中，V 的单位为 mile/h，r 的单位为 ft，N 的单位为 r/min。式（6-70）中，1mile = 5280ft，1h = 3600s。所以式（6-70）可改写为

$$N = \frac{14.01 \cdot V}{r} \tag{6-71}$$

风速为 10mile/h（14.67ft/s）时对应的转速为 124.2r/min。

风电机组在风轮转速低于 120r/min 的情况下利用齿轮传动系统捕获风能。齿轮箱的运行与变换器类似。齿轮箱可以进行转速和转矩转换。齿轮变速机理如图 6-23 所示。

$$T_{input}\omega_{input} = T_{output}\omega_{output} \tag{6-72}$$

式中，T_{input}和T_{output}为转矩，单位为 N · m，ω_{input}和ω_{output}的单位为 rad/s。为进行转矩转速变换，需要使用齿轮传动系统。齿轮箱结构上有很多传动齿。

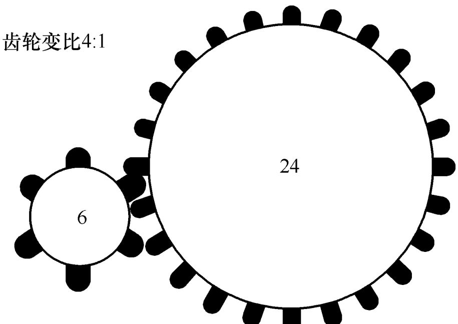


图 6-23　齿轮变速机理示意图

$$齿轮变比 = \frac{输入轮齿数}{输出轮齿数} = \frac{T_{input}}{T_{output}} \tag{6-73}$$

齿轮箱将风电机组风轮的低速、高转矩功率转换为发电机转子的高速、低转矩功率。功率范围在 600kW ~ 1.5MW 之间的风电机组使用的齿轮变比在 1 ~ 100 之间。

例 6.1　分析三相Y形绕线转子式感应电机以发电机状态与当地电网并联运行情况。电机额定参数为 220V，60Hz，14kW，8 极，电机参数如下：

定子电阻（R_1）为 0.2Ω/相，定子电抗（X_1）为 0.8Ω/相。

转子电阻（R'_2）为 0.13Ω/相，转子电抗（X_2）为 0.8Ω/相。

忽略励磁电抗和铁心损耗。

进行以下分析：

1）给出单线图和单相等效模型。

2）如果原动机转速为 1000r/min，确定当地电网与风电机组之间的有功功率和无功功率交换情况。如果风电机组以功率因数 1 运行，需要在电机定子终端配备多大容量的电容器组？

3）给出不同外接电阻值对应的转矩—转速特性曲线。

解

同步转速　$$N_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 60}{8}\text{r/min} = 900\text{r/min}$$

转子转速　$$N_r = 1000\text{r/min}$$

转差率　$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{900 - 1000}{900} = -0.111$$

对图 6-24b 所示电路使用基尔霍夫电压定律，则采用电动机惯例时的电流为

$$I_m = \frac{V_{grid}}{R_1 + R'_2/s + j(X_1 + X'_2)}$$

$$= \frac{220/\sqrt{3}}{0.2 - 0.13/0.111 + j(0.8 + 0.8)} A = 67.88\angle -121.22° A$$

作为电动机运行时，潮流从电网流向感应电机。作为发电机运行时，有功功率的流向与电动机运行时相反。利用电动机惯例并计算电流，电流相角大于 90°，这意味着电流的方向与图 6-24b 中以发电机惯例计算的电流方向相反。

采用发电机惯例时，从感应发电机流向电网的电流为

$$I_G = 67.88\angle 180° - 121.22° A = 67.88\angle 58.78° A$$

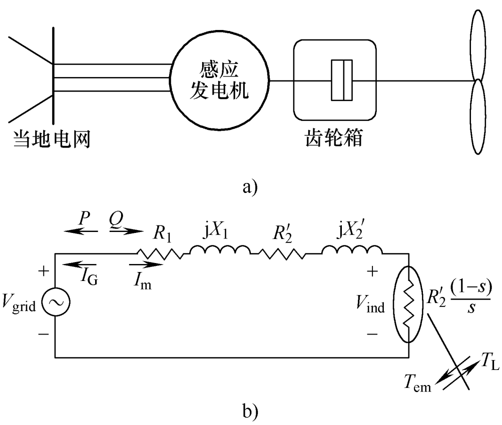


图　6-24

a）单线图　b）感应发电机单相等效电路

感应电压为

$$V_{ind} = \frac{1-s}{s} R'_2 \cdot I_G = \frac{1-(-0.111)}{-0.111} \times 0.13 \times 67.88\angle 58.78° V = 88.25\angle 58.78° V$$

忽略机械损耗，由供给的风能机械功率产生的电功率为

$$S_{ind} = 3V_{ind} \cdot I_G^* = 3 \times 88.25\angle 58.78° \times 67.88\angle -58.78° = 17.93 + j0 kVA$$

从 S_{ind} 可看出感应发电机发出了有功功率。不过，它并不发出无功功率。无功功率由电网提供。

感应发电机发出的功率注入到本地电网中，一些功率损耗在定子及转子电阻上。

注入电网的复功率为

$$S_{grid} = 3V_{grid} \cdot I_G^* = 3 \times \frac{220}{\sqrt{3}}\angle 0° \times 67.88\angle -58.78° = 13.41 - j22.12 kVA$$

感应发电机向电网注入 13.41kW 有功功率，但从电网吸收 22.12kvar 无功功率。

在感应发电机端接入一个三相Y联结的电容器组，如图 6-25 所示。当以功率因数 1 运行时，电容器组必须提供感应发电机需要的无功功率。

$$C_p = \frac{3V_{grid}^2}{2\pi f \cdot Q} = \frac{3 \times (220/\sqrt{3})^2}{2\pi \times 60 \times 22.12 \times 10^3}\text{F} = 5.8\text{mF}$$

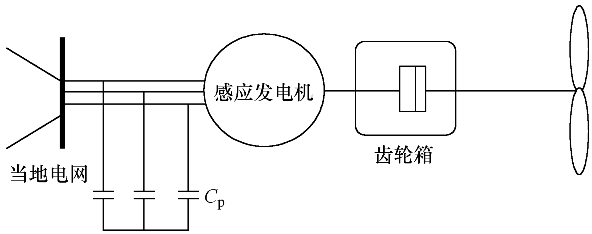


图 6-25　由电容器组就地提供无功补偿的笼型感应发电机

令外接电阻的阻值以 0.25Ω 的步长从 0 增加至 0.75Ω，电机转速从 0 增加至同步转速。在下述 MATLAB 测试平台中，对不同的外接电阻 R_{ext} 阻值进行图表分析。

```
%TORQUE vs SPEED
clc; clear all;
v1=220/sqrt(3);
f=60;
P=8;
r1=0.2;
x1=0.8;
r2d=0.13;
x2d=0.8;                              % The electrical
                                      quantities are defined
ws=120*f/P;
Tmax=-(3/2/ws)*v1^2/(r1+sqrt(r1^2+(x1+x2d)^2))
Tmax_gen=-(3/2/ws)*v1^2/(r1-sqrt(r1^2+(x1+x2d)^2))
w=0:1:2*ws;
for r_ext=0:0.25:0.75                 % the value of external
                                      resistance is varied
  Tstart=-(3/ws)*((r2d+r_ext)/1)*v1^2/((r1+(r2d+r_ext)/
  1)^2+(x1+x2d)^2)
  smax=(r2d+r_ext)/sqrt(r1^2+(x1+x2d)^2)
  for j = 1:length(w)
    s(j)=(ws-w(j))/ws;
    Tem(j)=-(3/ws)*((r2d+r_ext)/s(j))*v1^2/((r1+(r2d+
    r_ext)/s(j))^2+(x1+x2d)^2);
  end
   plot(w,Tem,'k','linewidth',2)
   hold on;
```

```
end
grid on;

xlabel('Speed')
ylabel('Electromagnetic Torque')
axis([0 2*ws 1.1*Tmax_gen 1.1*Tmax])
gtext('R_e_x_t=0')
gtext('R_e_x_t^,=0.25')
gtext('R_e_x_t^,^,=0.5')
gtext('R_e_x_t^,^,^,=0.75')
```

结果示于表 6-1，如图 6-26 所示。

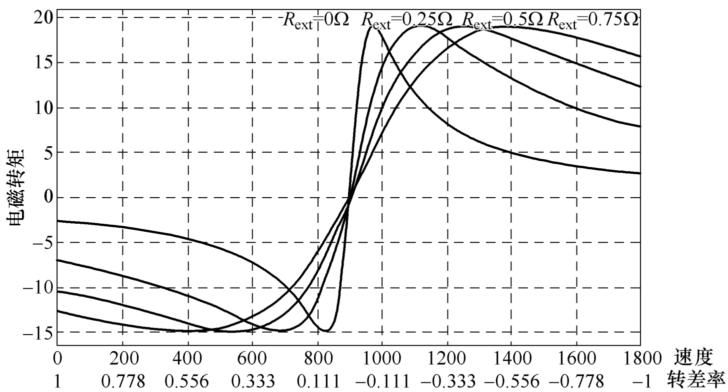


图 6-26 采用发电机惯例时，不同外接电阻对应的电机转矩特性示意图

表 6-1 例 6.1 的结果

外接电阻/Ω	起动转矩/N·m	最大转矩对应的转差率	最大转矩/N·m
0.00	-2.62	0.08	
0.25	-7.06	0.24	-14.84（电动机）
0.50	-10.43	0.39	19.04（发电机）
0.75	-12.70	0.55	

除了潮流方向是从驱动电机轴转动的风电流向电网之外，感应发电机的运行方式与感应电动机的运行方式相同。因此，感应发电机向当地电网注入或提供功率。采用电动机惯例时，电流的正方向为从电源流向电动机。采用发电机惯例时，电流的正方向为从电动机端电压流向当地电网。这意味着采用电动机惯例而电机以发电机模式运行时电流的符号为负。

例 6.2 对于例 6.1 中的电机，电机以相同供电电压与当地电网相连，采用电动机惯例给出速度范围在 1000~2000r/min 之间时的转矩—转差率特性曲线。写出 MATLAB M 文件程序并画图。

解

例 6.2 对应的 MATLAB M 文件程序如下：

```
%TORQUE vs SPEED
clc; clear all;
v1=220/sqrt(3);
f=60;
P=8;
r1=0.2;
x1=0.8;
r2d=0.13;
x2d=0.8;                        % The electrical quantities
                                are defined
ws=120*f/P;
w=-1000:0.2:2000;
for j = 1:length(w)
  s(j)=(ws-w(j))/ws;
  Tem(j)=(3/ws)*(r2d/s(j))*v1^2/((r1+r2d/s(j))^2+(x1+
  x2d)^2);
end
plot(w,Tem,'k','linewidth',2)
hold on;
grid on;
xlabel('Speed')
ylabel('Electromagnetic Torque')
```

从上例可得出以下结论：

ω_{syn}和 ω_m 旋转方向一致且 ω_{syn}大于 ω_m 时，是感应电机以电动机状态运行的工况。

在这一区域，由于 ω_{syn}和 ω_m 的旋转方向一致，因此式（6-70）中转差率的计算结果为正值。

$$s=\frac{\omega_{syn}-\omega_m}{\omega_{syn}} \tag{6-74}$$

$$R_{eff}=\frac{1-s}{s}R'_2 \tag{6-75}$$

ω_{syn}和 ω_m 旋转方向一致但 ω_{syn}转速小于 ω_m 时，感应电机以发电机状态运行。这种情况下，ω_{syn}和 ω_m 的旋转方向一致，但 ω_{syn}小于 ω_m。因此，这时机械功率由外部动力源提供给发电机轴，ω_m 大于 ω_{syn}，转差率为负值（$s<0$）。这种情况（$s<0$）代表以发电机状态运行。此时，式（6-75）给出的转子等效有效电阻为负值（见图 6-27），对应的功率（转矩）也为负值。这意味着机械功率驱动电机转动，电机再将其定子端的电功率注入电网。电机以发电机状态运行（见图 6-28）可以归纳为

1）$\omega_m>\omega_{syn}$。

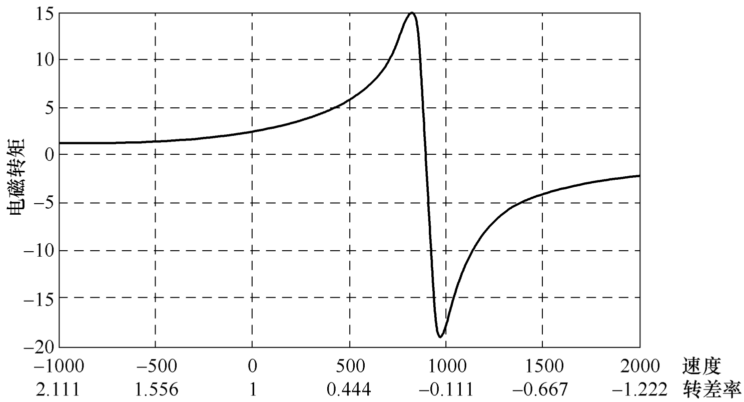


图 6-27 例 6.2 中感应电机转矩与速度关系曲线图

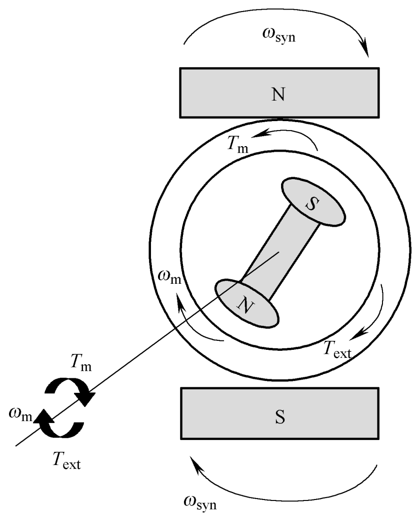


图 6-28 感应电机作为发电机运行时的示意图

2）ω_m 和 ω_{syn} 的旋转方向一致。

3）发电机方式：电功率通过定子终端注入电网。

4）$s=\dfrac{\omega_{syn}-\omega_m}{\omega_{syn}}<0$。

转差率为负表示电机以发电机状态运行。

当 ω_{syn} 与 ω_m 旋转方向相反时，电机以电磁制动方式运行。当感应电动机在正常条件下运行，电机转差率为正值且在稳定范围内（$0<s<s_{max}$）时，将定子任意两端子互换可以使电机以电磁制动模式运行。定子端子互换会使定子旋转磁场反向。相对于定子磁场，转子转速 ω_m 可以视为负值。在这种情况下，$s>1$，功率损耗为负，表示机械能正转化为电能。定子和转子绕组注入的功率均转化为定子电阻

上的热能。电机的这一运行区域称为电磁制动区域。

例 6.3　一台 8 极 60Hz 感应电机，转速为 1000r/min 时气隙功率为 3kW。转子铜耗为多大？

解

气隙功率为

$$P(\text{对转子的输入功率}) = P_{AG\phi} = 3|I_2|^2\frac{R'_2}{s}$$

转子铜耗为

$$P_{\text{rotor loss}} = 3|I_2|^2 R'_2$$

因此

$$\frac{P_{\text{rotor loss}}}{P_{\text{rotor in}} = P_{AG}} = \frac{3|I_2|^2 R'_2}{3|I_2|^2\dfrac{R'_2}{s}} = s$$

转子功率损耗 $P_{\text{rotor loss}}$是气隙功率的 s 倍，s 为转差率。

$$P_{\text{rotor loss}} = sP_{AG}$$

采用电动机惯例时，$P>0$ 表示电机消耗功率。

采用发电机惯例时，$P>0$ 表示电机发出功率。

同步转速为　$N_{syn} = 120\dfrac{f}{P} = 120\dfrac{60}{8}\text{r/min} = 900\text{r/min}$

转差率为　$s = \dfrac{N_{syn} - N_m}{N_{syn}} = \dfrac{900-1000}{900} = -0.111$

电机以感应发电机状态运行，如图 6-29 所示。

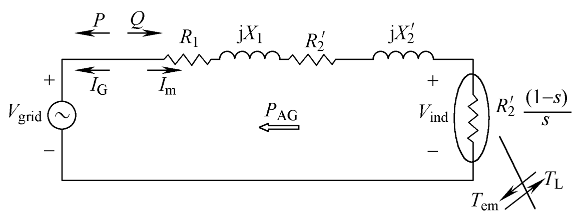


图 6-29　感应发电机单相等效电路

因此，采用发电机惯例时，气隙功率应反向，转子功率损耗为

$$P_{\text{rotor loss}} = -sP_{AG} = 0.111\times3000\text{W} = 333\text{W}$$

例 6.4　一台三相，6 极，Y联结感应发电机，额定参数为 400V，60Hz，运行转速为 1500r/min，输出电流为 60A，功率因数为 0.866 滞后。电机与当地电网并联运行，如图 6-30 所示。定子铜耗为 2700W，旋转损耗为 3600W。

进行以下分析：

1）确定感应发电机与电网之间的有功功率和无功功率潮流情况（见图 6-31）。

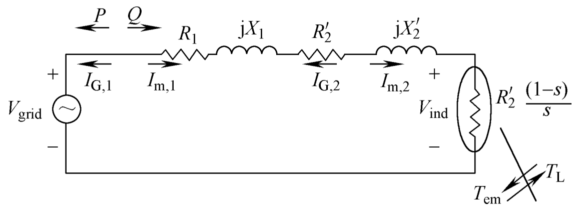


图 6-30　感应发电机单相等效电路图

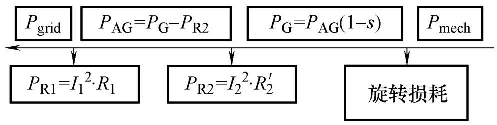


图 6-31　感应电机以发电机模式运行时的潮流示意图

2）如果感应发电机以功率因数 1 运行，需要为感应发电机提供多大容量的无功功率？

3）计算发电机的效率。

4）确定定子电阻、转子电阻的阻值和定、转子电抗的和。

5）计算转子提供的机电功率。

解

同步转速　$N_{syn} = 120\dfrac{f}{P} = 120\dfrac{60}{6}\text{r/min} = 1200\text{r/min}$

转差率　$s = \dfrac{N_{syn} - N_m}{N_{syn}} = \dfrac{1200 - 1500}{1500} = -0.25$

定子端的有功功率为

$$P_{grid} = 3V_{L-N} \cdot I_s \cdot \cos\theta = 3 \times \frac{400}{\sqrt{3}} \times 60 \times 0.866\text{W} = 36000\text{W}$$

定子端的无功功率为

$$Q_{grid} = 3V_{L-N} \cdot I_s \cdot \sin(\arccos\theta) = 3 \times \frac{400}{\sqrt{3}} \times 60 \times \sin(\arccos 0.866) = 20786\text{var}$$

当以功率因数 1 运行时，需要就地补偿的无功功率容量与定子端无功功率一致，即 $Q_{grid} = 20786\text{var}$

定子铜耗 $P_{R1} = 2700\text{W}$

气隙功率

$$P_{AG} = P_{grid} + P_{R1} = 36000\text{W} + 2700\text{W} = 38700\text{W}（三相）$$

固定损耗 $P_{rotational\ loss} = 3600\text{W}$。

输入机械功率，令 P_G 为转子提供的机电功率：

$$\begin{aligned} P_{mech} &= P_G + P_{rotational} = (1-s)P_{AG} + P_{rotational} \\ &= (1-(-0.25)) \times 38700\text{W} + 3600\text{W} = 51975\text{W} \end{aligned}$$

效率 $$\eta=\frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{mech}}}=\frac{36000}{51975}=0.6926=69.26\%$$

定子电阻 $$R_1=\frac{P_{\text{R1}}}{3I^2}=\frac{2700}{3\times60^2}\Omega=0.25\Omega$$

按发电机惯例计算，

转子铜耗为 $P_{\text{R2}}=-sP_{\text{AG}}=-(-0.25)\times38700\text{W}=9675\text{W}$

转子电阻为 $$R'_2=\frac{P_{\text{R2}}}{3I^2}=\frac{9675}{3\times60^2}\Omega=0.90\Omega$$

转子和定子电抗之和为

$$X=X_1+X'_2=\frac{Q_{\text{grid}}}{3I^2}=\frac{20786}{3\times60^2}\Omega=1.92\Omega$$

转子提供的机电功率为

$$P_{\text{R}'2}=-3I^2\frac{1-s}{s}R'_2=-3\times60^2\times\frac{1-(-0.25)}{-0.25}\times0.9\text{W}=48600\text{W}$$

6.7　动态特性

前面对感应电机的稳态运行情况进行了分析。而进行动态分析时，需要用一组微分方程建立电机模型。对于定子绕组，3 个耦合绕组绕定子正弦分布。如果这些耦合绕组用它们的自感或互感表示，可以得出一组 3 个时变微分方程。类似地，可以得到转子绕组的 3 个时变微分方程。电磁转矩可以用非线性代数方程表示，转子的动态特性可以用电动机转速的微分方程表示。因此，感应电机的动态特性可以用 7 个微分方程和 1 个代数方程表示。感应电机的动态建模是更复杂的问题，读者进行分析时需要参考补充文献。本节将对图 6-32 ~ 图 6-34 所示的动态分析结果进行研究。

图 6-32 为感应电机的起动过程。与预期结果一样，电机定子电流在达到稳态电流之前有多个周波的暂态振荡过程。由电网提供的稳态电流为电机励磁，由于电机为空载运行，因此电能最终转换为热能消耗掉。

图 6-33 为从静止（起动）到低于同步转速的空载速度下电机轴转速情况。

图 6-34 为电机的暂态振荡过程。从图 6-34 可以看出，电机经过 0.4s 的振荡过程，然后达到其最大转矩。感应电机在正常区间运行时低于电机最大转速。图 6-34给出了电机作为电动机运行的状态。由于电机模拟状态是从静止起动至空载运行，它可以产生足够的转矩支撑电机电阻及转动损耗。

图 6-35 为由感应电机组成的微电网系统示意图，图中感应电机以发电机状态运行。

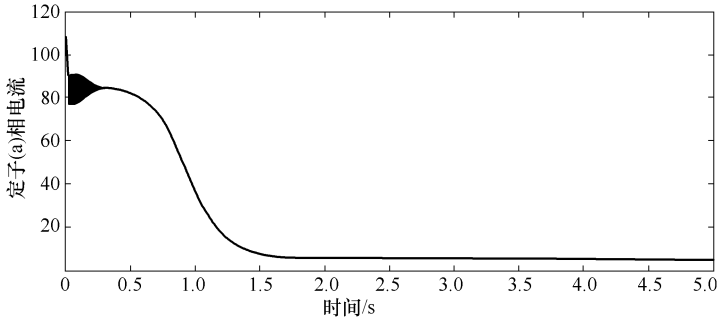


图 6-32 感应电机空载起动时的定子电流

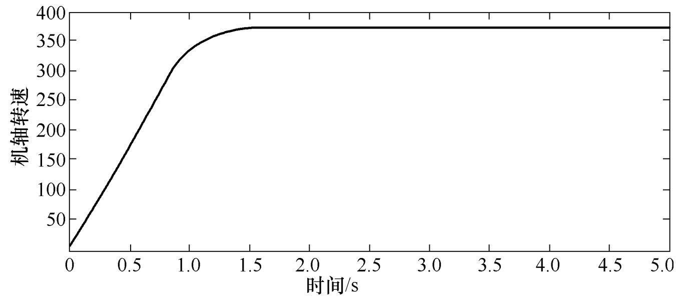


图 6-33 感应电机空载起动时的轴转速

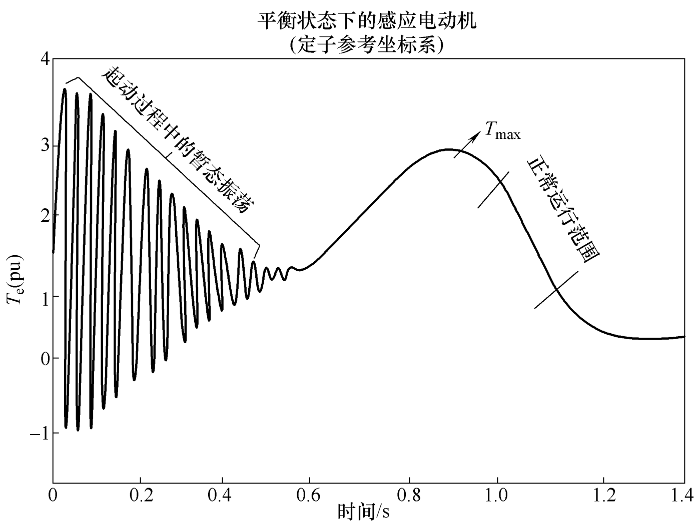


图 6-34 感应电机的动态特性

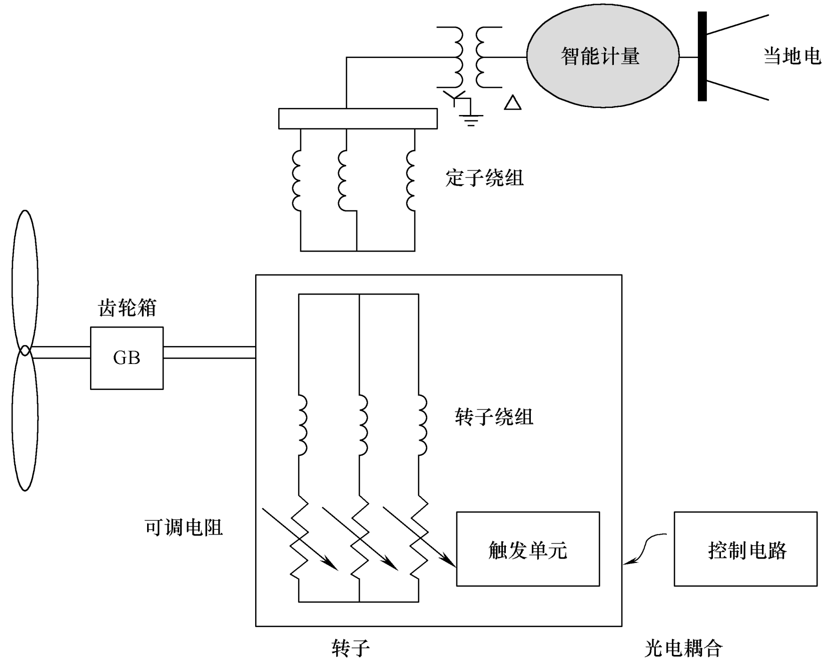


图 6-35　由感应电机组成的微电网系统，电机以感应发电机状态运行并向当地电网注入功率

例 6.5　分析图 6-36 给出的微电网系统，单相标幺值等效电路图如图 6-37 所示，系统数据如下：

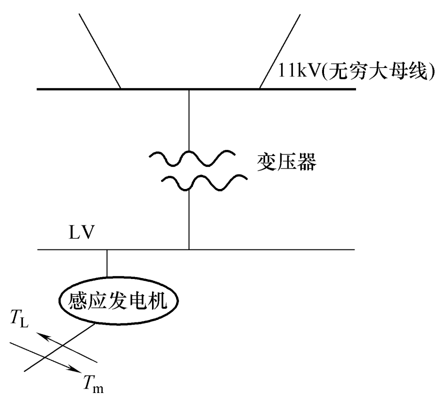


图 6-36　例 6.5 中与当地电网相连的微电网系统

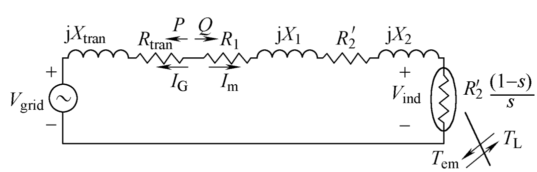


图 6-37　例 6.5 中单相标幺值等效电路图

变压器额定电压为 440V/11kV，电抗为 0.16Ω，电阻为 0.02Ω，额定容量为 60kVA。感应电机额定参数为 440V，60Hz，三相，8 极；50kVA，440V，60Hz；定子电阻为 0.2Ω/相；转子电阻折算至定子侧为 0.2Ω/相，定子电抗为 1.6Ω/相；转

子电抗折算至定子侧为0.8Ω/相。发电机转速为1200r/min。进行以下分析：

1）给出系统的标幺值模型。

2）计算向当地电网输送的功率。

3）计算电网与感应发电机之间的无功功率潮流情况。计算时基值取等于感应电机的额定参数。

解

1）取感应电机的额定参数为基值

$$S_b = 50\text{kVA}$$
$$V_b = 400\text{V}$$

系统的阻抗基值为

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{440^2}{50 \times 10^3}\Omega = 3.872\Omega$$

变压器电阻的标幺值为

$$R_{\text{tran,pu}} = \frac{R_{\text{tran}}}{Z_b} = \frac{0.02}{3.872} = 0.005$$

变压器电抗的标幺值为

$$X_{\text{tran,pu}} = \frac{X_{\text{tran}}}{Z_b} = \frac{0.15}{3.872} = 0.04$$

定子电阻的标幺值为

$$R_{\text{s,pu}} = \frac{R_s}{Z_b} = \frac{0.2}{3.872} = 0.052$$

折算至一次侧的转子电阻标幺值为

$$R'_{\text{r,pu}} = \frac{R'_r}{Z_b} = \frac{0.2}{3.872} = 0.052$$

定子电抗的标幺值为

$$X_{\text{s,pu}} = \frac{X_s}{Z_b} = \frac{1.6}{3.872} = 0.413$$

折算至一次侧的转子电抗标幺值为

$$X'_{\text{r,pu}} = \frac{X'_r}{Z_b} = \frac{0.8}{3.872} = 0.207$$

2）同步转速 N_s 为

$$N_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{9}\text{r/min} = 900\text{r/min}$$

转差率 s 为

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{900 - 1200}{900} = -0.333$$

式中，N 为电动机轴（转子）转速（r/min）。

转子电压频率为

$$f_r = s \cdot f_s$$

$$f_r = 0.333 \times 60\text{Hz} = 20\text{Hz}$$

供电电压为 440V = 1pu

电流基值

$$I_b = \frac{VA_b}{\sqrt{3}V_b} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 440}\text{A} = 65.61\text{A}$$

阻抗标幺值

$$Z_{pu} = \sqrt{(R_{s,pu} + R_{tran,pu} + R'_{r,pu}/s)^2 + (X_{s,pu} + X_{tran,pu} + X'_{r,pu})^2}$$

$$= \sqrt{(0.052 + 0.005 - 0.052/0.333)^2 + (0.413 + 0.04 + 0.207)^2} = 0.667$$

功率因数角为

$$\arctan\left(\frac{X_{s,pu} + X_{tran,pu} + X'_{r,pu}}{R_{s,pu} + R_{tran,pu} + R'_{r,pu}/s}\right)$$

$$= \arctan\left(\frac{0.413 + 0.04 + 0.207}{0.052 + 0.005 - 0.052/0.333}\right) = 98.54°$$

$$Z_{pu} = |Z_{pu}| \angle\theta = 0.667\angle 98.54°$$

采用电动机惯例，定子电流标幺值为

$$I_{pu} = \frac{V_b}{Z_{pu}} = \frac{1}{0.667\angle 98.54°} = 1.499\angle -98.54°$$

采用电动机惯例时的电流有名值为

$$I_m = I_b \times I_{pu} = 65.61\text{A} \times 1.499\angle -98.54° = 98.35\angle -98.54°\text{A}$$

由于该角度大于 90°，因此潮流方向是从感应发电机流向当地电网。

采用发电机惯例时，电流反向，如图 6-37 的 I_G 所示。

因此，采用发电机惯例时的电流为

$$I_G = 98.35\angle 180° - 98.54° = 98.35\angle 81.46°$$

流入电网的有功功率为

$$P_{grid} = \sqrt{3} \cdot V_{grid} \cdot I_G \cdot \cos\theta = \sqrt{3} \times 440 \times 98.35 \times \cos 81.46°\text{W} = 11130\text{W}$$

变压器内损耗的有功功率为

$$P_{loss} = 3I_G^2 R_{trans} = 3 \times 98.35^2 \times 0.02\text{W} = 580\text{W}$$

因此，感应发电机注入变压器的有功功率为

$$P = P_{grid} + P_{loss} = 11130\text{W} + 580\text{W} = 11710\text{W}$$

注入电网的无功功率为

$$Q_{grid} = \sqrt{3} \cdot V_{grid} \cdot I_G \cdot \sin\theta = \sqrt{3} \times 440 \times 98.35 \times \sin 81.46°\text{var} = 74121\text{var}$$

变压器的无功损耗为

$$Q_{loss} = 3I_G^2 X_{trans} = 3 \times 98.35^2 \times 0.15\text{var} = 4355\text{var}$$

因此，感应发电机消耗的无功功率为

$$Q = Q_{\text{grid}} + Q_{\text{loss}} = 74121\text{var} - 4355\text{var} = 69766\text{var}$$

例 6.6 分析一台三相Y形绕线转子式感应电机。电机额定参数为 220V，60Hz，16hp[㊀]；电机的极数可以从 2 极至 12 极之间变化以适应风速变化。

电机参数如下：

$$R_1 = 0.2\Omega/相, X_1 = 0.4\Omega/相$$

$$R_2' = 0.13\Omega/相, X_2' = 0.4\Omega/相$$

画出通过改变电机极数适应风速变化的电机的功率—转速对应曲线。

以下 MATLAB M 文件可表示上述电机的运行情况：

```
%POWER vs SPEED
clc;
v1=220/sqrt(3);
f=60;
P=2;
r1=0.2;
x1=0.4;
r2d=0.13;
x2d=0.4;                               % The electrical
                                       quantities are defined
for P=2:2:12                           % The no. of poles is
                                       varied from 2 to 12
  ws=120*f/P;
  w=0:.2:7200;                         % The value of speed
                                       is varied till
                                       synchronous speed
  for i=1:length(w)
    s(i)=(ws-w(i))/ws;
    Tem(i)=(3/ws)*(r2d/s(i))*v1^2/((r1+r2d/s(i))^2+
    (x1+x2d)^2);
    Po(i)=-Tem(i)*w(i)/1000;   % Power in kW
  end
  plot(w,Po)
  hold on;
end
axis([0 7200 0 50])
grid on;
set(gca,'XDir','reverse')
xlabel('Speed (rpm)')
ylabel('Power (kW)')
```

图 6-38 是极数可变的感应发电机在不同转速下的功率与转速的关系。

㊀ 译者注：1hp = 745.700W。

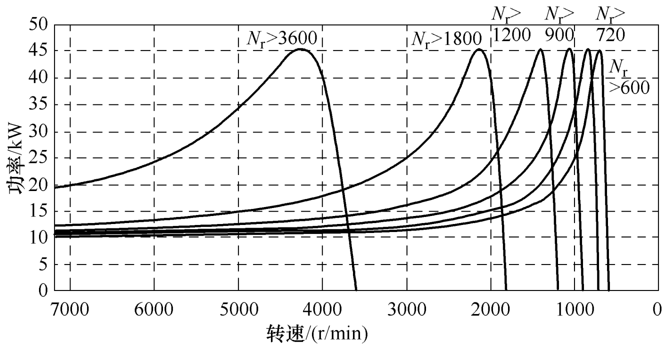


图 6-38　极数可变感应发电机不同转速下的功率—转速关系曲线

6.8　双馈感应发电机

电机按照机械能至电能的转换过程中使用的绕组数量分类。单馈电机只有一个绕组。笼型感应电机与能量转换系统相关的绕组也只有一个。双馈电机与能量转换相关的绕组有两个。绕线式双馈感应发电机（Double-Fed Induction Generator，DFIG）[20]是唯一一种在给定运行频率下以额定转矩运行时有双重同步转速的电机。在 DFIG 中，流经励磁支路的电流和转矩电流是正交矢量。设计采用转子励磁的电机不大可取，因为这需要附属的换相系统、集电环和电刷将电流引入转子绕组，而且它的维护成本高。不过，这类电机定子功率因数可以达到 1。转子电压的频率和幅值与式（6-30）中的转差率成正比。原则上，DFIG 静止时可看作一个变压器。

如果 DFIG 产生转矩并以电动机状态运行，转子消耗功率。静止时注入定子的功率全部转化为定子和转子上的热能。当转速较低时，由于馈电电流主要用于产生励磁电流，而作为电动机或发电机的功率转换过程并未发生，因此 DFIG 的效率很低。如果 DFIG 在同步转速以上运行，机械功率同时注入定子和转子。因此，与单馈电机相比，这种类型的电机可以产生双重功率，效率也更高。

当 DFIG 在同步转速以下运行时，定子绕组发出电功率且部分发出功率又反馈至转子。当 DFIG 在同步转速以上运行时，转子绕组和定子绕组均向电网提供电功率。不过，同样容量的 DFIG 产生的转矩并不高于单馈电机。获得的额定功率更高是因为转速更高且磁通未弱化。

图 6-38 为 DFIG 结构系统示意图。图中所示 DFIG 为一台绕线转子型感应发电机（Winding Rotor Induction Generator，WRIG），其定子绕组与电网直接相连。DFIG 有两组并列的 AC/DC 变换器单元。尽管这些变换器共同动作，但它们的额定功率却不一定完全一样。

转子绕组与转子侧的 AC/DC 变换器和电网侧的 DC/AC 变换器相连㊀。这种背靠背式的变换器以含共用直流母线的双向功率变换器方式运行。图 6-39 的变压器有两个二次绕组；一个与定子相连，另一个与转子相连。转子侧变换器可以在直流母线电压较低的条件下使转子励磁。通过变换器独立控制转子励磁电流可以实现有功功率和无功功率的解耦控制，因此这种 DFIG 可以进行无功功率控制。DFIG 可以向电网提供（或从电网吸收）无功功率。控制方法基于变速/变桨调节，采用两级分级控制。风速过大时，控制器可以用于跟踪风电机组的运行点，以限制风电机组运行功率。此外，控制器还控制注入电网的无功功率和风电机组消耗的无功功率。功率监控控制器控制桨距角，使风电机组以额定功率运行。同时，速度控制器控制发电机轴转速，以确保发电机在安全范围内运行。不过，在风速较低时，转速控制器将尽可能提高机组输出功率并提高发电机效率。因此，发电机转速根据风速的缓慢变化进行调整。

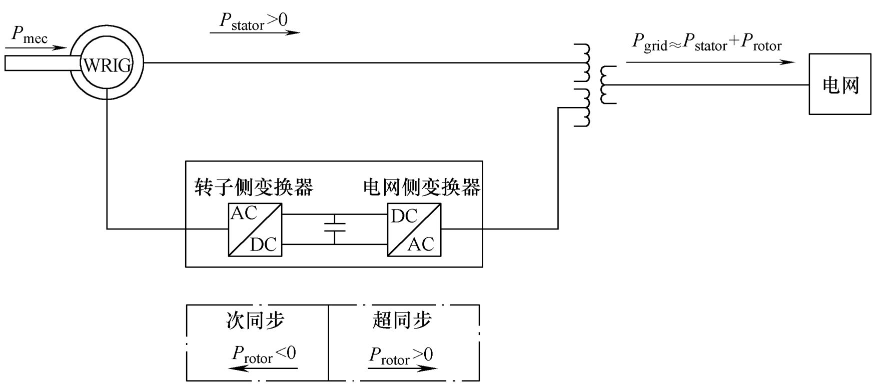


图 6-39　由双馈感应绕线转子型发电机组成的微电网系统

作为 DFIG 系统的固有部分，发电机定子端电压一般较低，它通过升压变压器将最高达 70% 的发电机输出功率馈入电网。DFIG 系统的一个显著缺点是发电机内部存在杂散电流。这些电流会加速发电机轴承损坏。可以采取的保护措施包括设计专门的发电机轴承且/或密封轴承保护罩以避免杂散电流的不利影响。

与常规感应发电机相比，绕线转子型 DFIG 有一系列优势。由于转子绕组由变换器控制，感应发电机可以发出或吸收无功功率。因此，当电网电压受到扰动时，DFIG 可以通过提供无功功率支持的方式提高电力系统的稳定性。作为 DFIG 系统的固有部件，发电机定子将剩余的 70% ~76% 总功率直接注入电网。通常定子电

㊀ 译者注：原文为“电网侧 AC/DC 变换器和转子侧 DC/AC 变换器”，有误，也与图 6－39 不一致。现改为“转子侧 AC/DC 变换器和电网侧 DC/AC 变换器”。

压为 690V。风能微电网系统通过升压变压器与本地电网相连。DFIG 系统可以设计成适用于 60Hz 和 50Hz 电力系统，但不同的电网条件要求发电机运行要适应特定的运行情况。然而，DC/AC 变换器的控制是一个复杂课题，本书将不涉及。对绿色节能系统涉及的变换器控制感兴趣的读者可参阅参考文献［23］。与绕线转子型感应发电机相比，笼型感应发电机的制造成本更低且设计相对简单；它们结构皮实、性价比高，在风能微电网系统中得到广泛应用。

6.9　无刷双馈感应发电机系统

无刷双馈感应发电机系统[21]的定子设计成有两组极对数不同的多相绕组结构。其中一个定子绕组设计为功率绕组并与电网相连。第 2 个绕组由一个变换器供电并控制能量转换过程。发电机通过调整与变换器相连绕组的频率进行控制。由于两个绕组的极对数不同，因此与电网相连的绕组将在与风力机转子对应的速度范围内产生低频磁感应。无刷双馈感应发电机系统不能有效利用磁芯。双绕组结构使定子体积与同功率等级的其他电机相比要大。

6.10　变速永磁发电机

此类发电机可在变化风速下运行[22]。它含一个“全”功率 AC/DC 及 DC/AC 变换器。直流功率通过 DC/AC 逆变器逆变并与升压变压器相连，然后如图 6-41 所示那样接入当地电网。

图 6-41 所示变速感应发电机产生幅值和频率均可变的交流电压。由于发电机发出的频率与当地电网频率不相等，根据第 4 章的内容（见自动发电控制部分），变频发电机的输出功率不能直接注入当地电网。因此，频率变化的交流电压先通过 AC/DC 整流器进行整流（见图 6-41）。图 6-40 所示直流母线可通过一个升降压变换器给储能系统充电。图 6-42 所示为一个变速发电机。此类发电机已在第 4 章中进行了讨论。图 6-42 所示发电机的励磁绕组的供电来自微电网交流母线经过 AC/DC 整流器整流得到的直流功率。由于风机输入的机械功率随时间变化，因此发电机的输出功率也会随时间变化。DC/AC 逆变器用于将直流功率转换为交流功率，转换后功率的频率和电压与图 6-41 和图 6-42 所示当地电网相同。由于风电微电网系统的运行频率与当地电网频率相同，因此可接入当地电网。不过，图 6-41 和图 6-42所示变换器之间的协调控制是更复杂的问题，本书中将不涉及。对绿色节能系统涉及的变换器控制感兴趣的读者可参阅参考文献［23］。

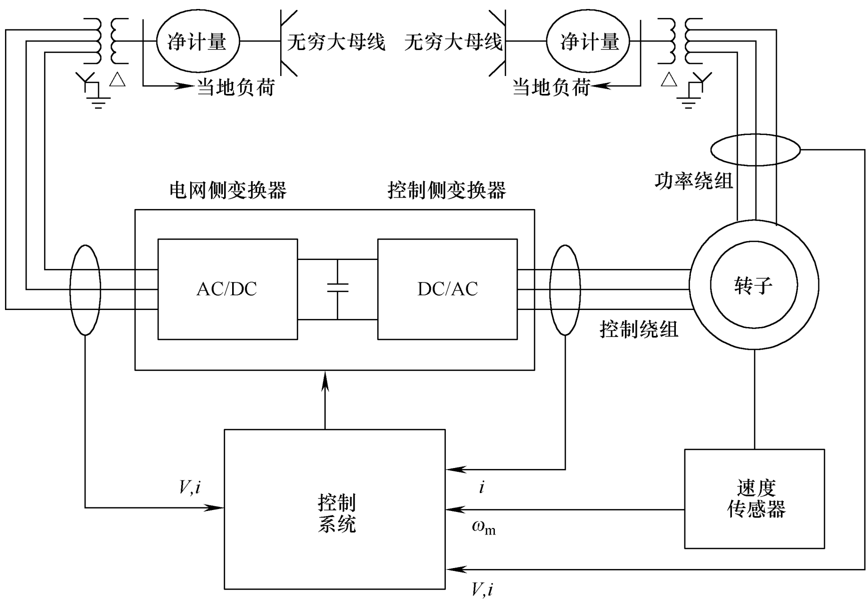


图 6-40　由无刷双馈感应发电机组成的微电网

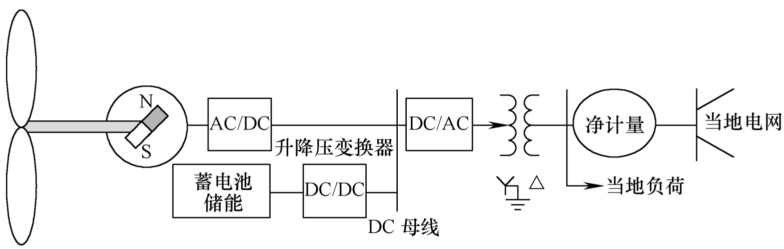


图 6-41　由变速永磁风力发电机组成的微电网

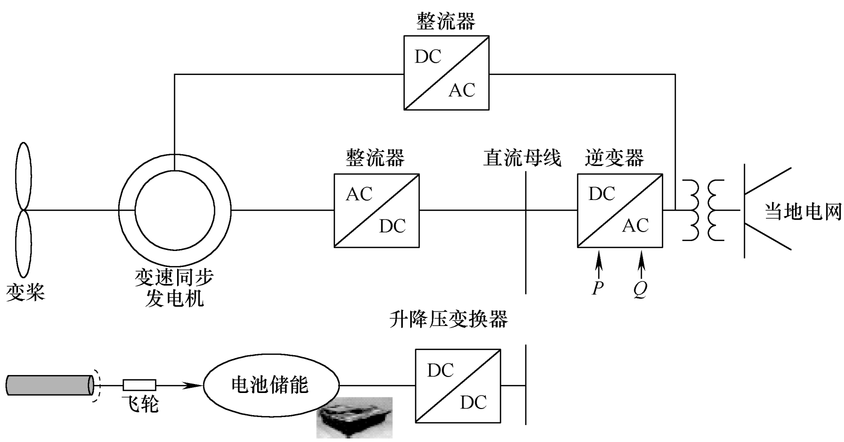


图 6-42　由多极同步发电机组成的微电网

6.11　变速同步发电机

同步发电机的转子以同步转速旋转[19,21]。对于同步发电机，定子绕组感应电压的频率由下式决定：

$$\omega_{syn}=\frac{2}{p}\omega_s$$

如果 $p=2$，则 $\omega_{syn}=\omega_s$。

感应电压的频率为

$$\omega_s=2\cdot\pi\cdot f_e$$

如果风速变化，感应电压也会随时间变化，其频率也会相应成比例增减。图 6-43 给出了此类基于风电的微电网系统。不过，在发电机并入本地电网之前，发电机必须旋转在同步转速。根据给定场地的预期风速，发电机可设计为带齿轮系统。通过调节齿轮变比使发电机转速保持在同步转速，从而使发电机定子感应电压频率与当地电网频率保持一致。

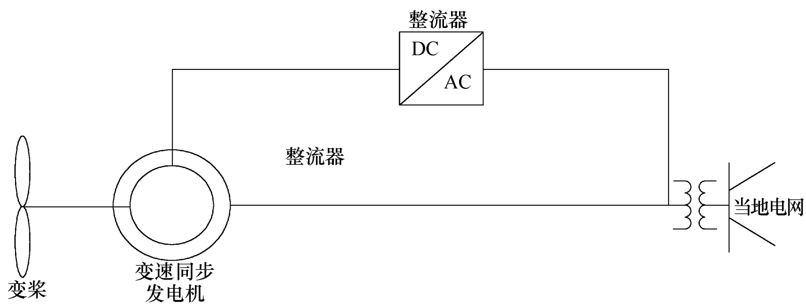


图 6-43　变速同步发电机

6.12　带与电网隔离变换器的变速发电机

另一类风电机组的发电机系统包括一台电气励磁机和一台双馈感应发电机。与常规双馈感应发电机系统不同，这类发电机带一个变换器。由于自带励磁电机，它可以使功率变换器隔离，不与电网直联。就是说，定子是唯一的联网输出。这种方法与常规 DFIG 的联网方式不同。常规 DFIG 的发电机转子功率也通过功率变换器馈入电网。

图 6-44 所示为带与电网隔离变换器的变速风电机组发电机。第一个变换器为 DC/AC 逆变器，用于向 DGIF 的转子回路馈电。不过，在这种拓扑结构下，第二个

变流单元是一个 AC/DC 整流器，需要由外部励磁电机供电（见图 6-44）[⊖]。

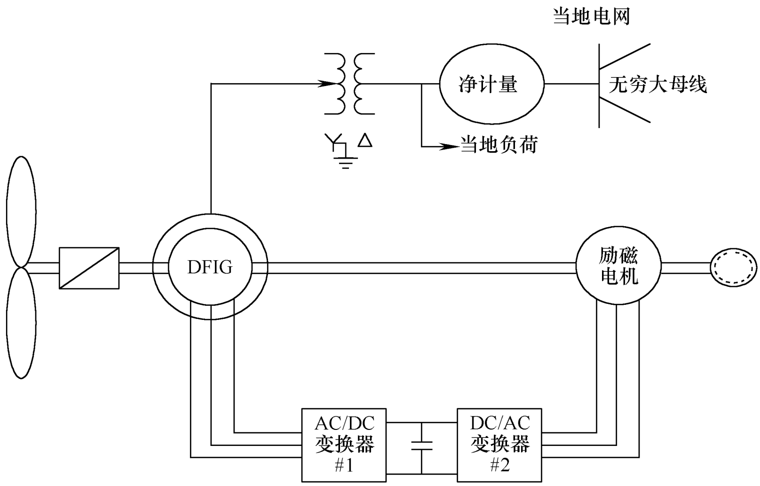


图 6-44 由带电网隔离变换器的变速风电机组组成的微电网系统

此外，与同步电机或异步电机不同，当风电机组突然从电网中切除或风速突然增大时，DFIG 本身不能提供电气制动功能。不过，在上述拓扑结构中，励磁电机可以提供电气制动的功率。电气制动可以与气动制动装置共同作用，尽量减少转矩峰值荷载。

与常规发电机组相比，这种风电机组的特点是惯量较低，因此，它不能参与电力系统的负荷—频率调节。如果风电机组配有储能系统，则它们可以参与负荷—频率控制。变速风电机组采用基于背靠背功率变换器的方案设计。变换器的中间直流母线可以实现电机和电网之间的电气解耦。这种解耦为利用变速风电机组参与负荷—频率控制提供了新的机会。

例 6.7 为一台运行电压为 AC690V 的 600kW 变速风力发电机选择 AC/DC 整流器和 DC/AC 逆变器。电网侧电压为 1000V。

解

瞬时线电压的峰值为

$$V_{\mathrm{L-L,peak}} = \sqrt{2} \cdot V_{\mathrm{L-L,rms}} = \sqrt{2} \cdot 690\mathrm{V} = 975.8\mathrm{V}$$

因此，直流侧整流器额定电压应≥975.8V。

令整流器额定电压为直流侧 1000V，交流侧 690V。逆变器也可根据交流侧额定电压为 1000V 选取。整流器和逆变器的额定功率均为 600kW。

本章讨论了感应电机建模及分别作为电动机和发电机运行的情况。当微电网系统采用感应电机作为电源时，需要当地电网提供励磁电流以支撑电机以发电机状态

⊖ 译者注：注意，这里说的“第一个”、“第二个”与图 6－44 中的#1、#2 并不一致，而是相反。

运行。如果基于风能的微电网系统与当地电网相连，则电网将提供励磁电流。因此，当地电网设计时应考虑风能微电网系统运行时的无功功率（var）需求。

本章回顾了双馈感应发电机、变速感应发电机和变速永磁发电机的内容[20-23]。变换器的协调控制问题更加复杂，本书中将不涉及。对绿色节能系统涉及的变换器控制感兴趣的读者可参阅参考文献［23］。

习　　题

6.1　考虑图 6-45 中给出的风能微电网系统。系统的当地负荷额定容量为 100kVA，额定功率因数为 0.8 滞后。

三相变压器额定参数为 11kV/0.44kV；300kVA；$X = 0.06$pu。感应发电机参数为 440V，60Hz，三相，8 极；定子电阻为 0.08Ω/相；转子电阻折算至定子侧为 0.07Ω/相；定子电抗为 0.2Ω/相；转子电抗折算至定子侧为 $X_2 = 0.1$Ω/相。计算以下内容：

1）容量基值为 300kVA、电压基值为 440V，计算对应的等效标幺值电路模型。

2）机轴转速为 1200r/min 时对应的机轴机械功率。

3）注入当地电网的功率数值。

4）电网和当地微电网之间的无功功率潮流情况。

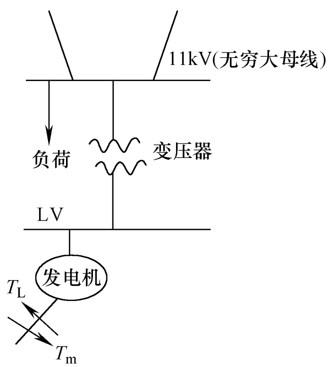


图 6-45　习题 6.1 的系统示意图

5）为使当地电网功率因数为 1，应在当地电网配置多大容量的无功补偿装置？

6.2　图 6-46 所示微电网系统由感应发电机供电。系统带的当地负荷额定容量为 100kVA，额定功率因数为 0.8 滞后。三相变压器额定参数为 11kV/0.44kV，300kVA，阻抗为 6%。感应电机额定参数为 440V，60Hz，三相，8 极，500kVA；定子电阻为 0.1Ω/相；转子电阻折算至定子侧为 0.1Ω/相；定子电抗为 0.8Ω/相；转子电抗折算至定子侧为 0.4Ω/相。计算以下内容：

1）容量基值为 500kVA，电压基值为 440V，计算标幺值潮流模型和短路模型。

2）如果感应发电机转速为 1000r/min，转子频率为多少？

3）分析微电网系统与当地电网之间的有功功率和无功功率交换。

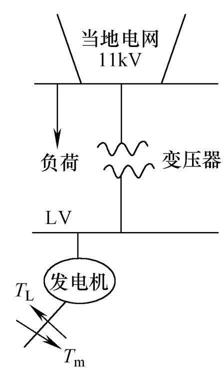


图 6-46　习题 6.2 的系统示意图

6.3　一台 6 极绕线转子型感应电机额定参数为 60Hz，380V，160kVA。感应电机的定子电阻与折算至定子侧的转子电阻相同，均为 0.8Ω/相，定子电抗和转子电抗均为 0.6Ω/相。发电机轴转速为 1500r/min。确定当发电机转速为 1800r/min 时转子电路外接电阻的阻值。

6.4　一台 400V、三相、Y联结感应发电机参数如下：

$$\overline{Z}_1 = (0.6 + j1.2)\Omega/相$$

$$\overline{Z}'_2 = (0.5 + j1.3)\Omega/相$$

该发电机与当地电网相连。进行以下计算：

1）发电机可提供的最大有功功率。

2）感应发电机与当地电网之间的无功功率潮流情况。

6.5　设计一台由变化风速提供动力的 15kW 风力发电用发电机。设计的系统应能提供 AC 220V、单相交流功率，计算直流母线电压。

6.6　与习题 6.5 相同，但风力发电系统需要提供额定电压为 210V 的三相交流电源，计算直流母线电压。

6.7　设计一台由变风速系统提供动力的 2MW 风力发电系统。直流母线额定电压为 DC 600V。配电盘离当地电网 5mile。当地电网为三相交流，额定电压为 34.5kV。假定额定功率因数为 0.8 滞后。

输电线参数见表 6-2。变压器参数为 460V/13.2kV，250kVA，阻抗为 10%；13.2～34.5kV，1MVA，阻抗为 8.5%。

表 6-2　13.2～132kV 电压等级单相中性回路线路模型

导线㊀	直流电阻/(Ω/km)	电抗 L/(Ω/km)	电纳 C/(S/km)	额定电流/A
Magpie	1.646	j0.755	$j1.45\times10^{-7}$	100
Squirrel	1.3677	j0.78	$j6.9\times10^{-7}$	130
Gopher	1.0933	j0.711	$j7.7\times10^{-7}$	150

根据以上参数进行下列分析：

1）画出单线图。

2）根据发电机额定数据给出标幺值模型。

6.8　绕线转子型 6 极 60Hz 感应发电机，定子电阻为 1.1Ω/相，转子电阻为 0.8Ω/相，运行转速为 1350r/min。在所有转速范围内原动机转矩均保持恒定。如果将发电机转速调整至 1800r/min，需要在转子回路中插入多大阻值的电阻？忽略电机漏感 X_1 和 X_2。

6.9　考虑三相Y形绕线转子型感应发电机，额定电压为 220V，额定频率为 60Hz，额定功率为 16hp，8 极。发电机参数为

$$R_1 = 1\Omega/\text{相}, X_1 = 1.6\Omega/\text{相}$$

$$R'_2 = 0.36\Omega/\text{相}, X_2 = 1.8\Omega/\text{相}$$

该发电机与当地电网相连。

写出 MATLAB 仿真程序，表示转子电路插入不同外接电阻时转差率和转速与电机转矩之间的关系。当外接电阻阻值分别为 0.0Ω、0.4Ω、0.8Ω 和 1.2Ω 时，给出对应的关系图。

参 考 文 献

1. Wikipedia. History of wind power. Available at http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_Energy#History. Accessed 2009 Aug 10.
2. Technical University of Denmark. National Laboratory for Sustainable Energy. Wind Energy. Available at http://www.risoe.dk/Research/sustainable_energy/wind_energy.aspx Accessed 2009 July 11.

㊀ 译者注：表 6－2 第 1 列的导线名称（型号）［Magpie（喜鹊），Squirrel（松鼠），Gopher（囊地鼠，产自北美的一种地鼠）］意义不明，可以理解为 3 种不同导线。

3. California Energy Commission. Energy Quest. Chapter 6: Wind energy. Available at http://www.energyquest.ca.gov/story/chapter16.html. Accessed 2009 June 10.
4. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov/energy explained/index.cfm?page=us_energy._Accessed 2009 Sept 10.
5. U.S. Department of Energy. U.S. installed wind capacity and wind project locations. Available at http://www.windpoweringamerica.gov/wind_installed_capacity.asp. Accessed 2011 March 1.
6. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory. Available at http://www.nrel.gov/. Accessed 2011 March 1..
7. Jangamshetti SH, Guruprasada Rau V. Site matching of wind turbine generators: a case study. IEEE Transactions in Energy Conversion 1999; 14(4):1537–1543.
8. Jangamshetti SH, Guruprasada Rau V. Optimum siting of wind turbine generators. IEEE Transactions of Energy Conversion 2001; 16(1):8–13.
9. Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A, Graber D. Methods of estimating wind speed frequency distribution. Journal of Applied Meteorology 1978; 17(3):350–353.
10. Quaschning V. Understanding renewable energy systems. London: Earthscan; 2006.
11. Freris L, Infield D. Renewable energy in power systems. Hoboken, NJ: Wiley; 2008.
12. Patel MK. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006.
13. Hau E. Wind turbines: fundamentals, technologies, application and economics. Heidelberg: Springer; 2006.
14. Simoes MG, Farrat FA. Alternative energy systems: design and analysis with induction generators. Boca Raton, FL: CRC Press; 2008.
15. AC Motor Theory. Available at http://www.pdftop.com/ebook/ac+motor+theory/. Accessed 2010 Dec 5.
16. HSL Automation Ltd. Basic motor theory: squirrel cage induction motor. Available at http://www.hslautomation.com/downloads/tech_notes/HSL_Basic_Motor_Theory.pdf. Accessed 2010 Oct 10.
17. Krause P, Wasynczuk O. Electromechanical motion devices. New York: McGraw-Hill; 1989.
18. Majmudar H. Electromechanical energy converters. Reading, MA: Allyn & Bacon; 1966.
19. Sung SWF, Rudowicz C. A closer look at the hysteresis loop for ferromagnets Available at http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0210/0210657.pdf. Accessed 2010 Dec 5.
20. Pena R, Clare JC, Asher GM. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. IEEE Proceedings of Electric Power Applications 1996; 143(3):231–241.
21. 1999 European Wind Energy Conference: Wind energy for the next millenium. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Nice, France, 1–5 March 1999. London: Earthscan; 1999.
22. Boldea I. The electric generators handbook. Variable speed generators. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005.
23. Keyhani A, Marwali M, Dai M. Integration of green and renewable energy in electric power systems. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.

第 7 章　电网和微电网的潮流分析

7.1　引言

我们已经明确，配电的主要目的是对规定的负荷提供额定电压和额定频率。第 4 章讨论了负荷频率控制；现在论述的重点是电压控制。为保证电网每条母线上的电压都在规定范围内，必须模拟系统的稳态状况。因此，也必须考察作为微电网的一部分接入当地电网的可再生能源的并网以及微电网的同步运行。母线负荷电压的计算被表述为潮流问题。一旦确定了负荷电压——包括母线电压的幅值和相位——线路的潮流就可以根据线路阻抗和两端的电压来计算。这就需要把潮流分析作为一种工程工具来使用。在潮流问题的表述中，我们将研究如何对互联输电系统建模。本章将介绍母线导纳矩阵和母线阻抗矩阵。本章结尾部分将回顾潮流问题的 3 种解法：高斯-赛德尔（Gauss-Seidel）法，牛顿-拉夫逊（Newton-Raphson）法和快速解耦法。本章还将给出几个解题实例和习题，使读者能进一步加深对微电网的理解。

7.2　电网分析中的电压计算

在电路问题中，负荷阻抗和电源电压为已知，要求求出电路的潮流和每个负荷上的电压。在功率问题的电压计算中，负荷是有功功率和无功功率的消耗者。研究这一问题有两个方法：①负荷上的电压为已知，求电源电压；②电源电压为已知，计算母线负荷电压（这类问题被称为潮流或负荷潮流问题）。例 7.1 给出的是第一种方法。

例 7.1　三相电源通过两条阻抗相等的串联电缆（$Z=4+\mathrm{j}15\Omega$）接到两个三相负荷。第一个负荷是Y联结的，额定值为 440V，8kVA，$pf=0.9$（滞后）；第二个负荷是△联结的电动机，额定值为 440V，6kVA，$pf=0.85$（滞后）。电动机位于线路末端，它的△联结负载要求负载电压为 440V。进行以下计算：

1）画出单线图。

2）求出需要的馈电电压。

解

例 7.1 的单线图如图 7-1 所示。

母线 3 上的线电压为 440V。

母线 3 上的电动机吸取的额定电

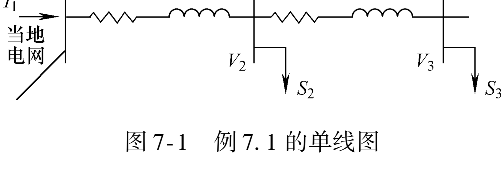


图 7-1　例 7.1 的单线图

流为

$$I_3=\frac{kVA_{r3}}{\sqrt{3}\cdot V_3}=\frac{6000}{\sqrt{3}\times 400}\angle -\arccos 0.85\text{A}=7.87\angle -31.77°\text{A}$$

母线 2 上的电压为

$$V_{2,\text{ph}}=V_{3,\text{ph}}+Z_{2-3}\times I_3=440/\sqrt{3}\text{V}+(4+\text{j}15)\times 7.87\angle -31.77°\text{V}$$
$$=353.04\angle 13.7°\text{V}$$

母线 2 负荷吸取的额定电流为

$$I_2=\frac{kVA_{r2}}{3\cdot V_2}=\frac{8000}{3\times 353.04}\angle -\arccos 0.9\text{A}=7.55\angle -25.84°\text{A}$$

发电机的供电电流为

$$I_1=I_2+I_3=7.55\angle -25.84°\text{A}+7.87\angle -31.77°\text{A}=15.39\angle -28.87°\text{A}$$

发电机的相电压为

$$V_1=V_2+Z_{1-2}\times I_1=353.04\angle 13.7°\text{V}+(4+\text{j}15)\times 15.39\angle -28.87°\text{V}$$
$$=569.21\angle 26.73°\text{V}$$

发电机的线电压为

$$V_1\sqrt{3}=569.21\times\sqrt{3}\text{V}=985.90\text{V}$$

例 7.1 并不符合实际情况。发电机电压由它的励磁系统控制。实际上，励磁电流的设置目标是要使发电机得到额定电压。如果发电机有两个极，而且运行于 60Hz 系统的同步转速，则它的转速为 3600r/min。

因此，在实际问题中，需要计算的是在发电机电压和负荷消耗功率已知情况下的负荷母线电压。后一问题被称为潮流问题。它的解法更为复杂。

例 7.2　考虑图 7-2 的分布式馈电系统。假定

1）馈线阻抗 Z_{1-2}和 Z_{2-3}为已知。

2）负荷消耗的有功功率和无功功率，即 S_2 和 S_3 为已知。

3）当地电网的母线电压 V_1 为已知。所有数据都是标幺值。

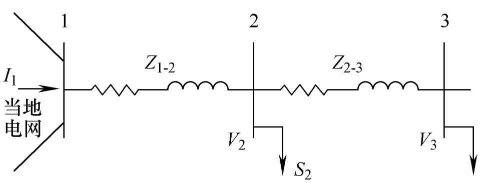


图 7-2　一个配电馈送系统的示意图

解

首先对图 7-2 每个节点（母线）写出基尔霍夫电流定律，并假定从母线流出的电流之和为零。即对于母线 1 ~3，有

$$\begin{aligned}&(v_1-v_2)y_{12}-I_1=0,\\&(v_2-v_1)y_{12}+(v_2-v_3)y_{23}+I_2=0\\&(v_3-v_2)y_{23}+I_3=0\end{aligned}\tag{7-1}$$

式中，$y_{12}=1/Z_{1-2}$，$y_{23}=1/Z_{2-3}$。

$$I_1=\left(\frac{S_1}{V_1}\right)^*,I_2=\left(\frac{S_2}{V_2}\right)^*,I_3=\left(\frac{S_3}{V_3}\right)^* \tag{7-2}$$

式（7-1）可改写为

$$\begin{aligned}y_{12}v_1-y_{12}v_2&=I_1\\-y_{12}v_1+(y_{12}+y_{23})v_2-y_{23}v_3&=-I_2\\-y_{23}v_2+y_{23}v_3&=-I_3\end{aligned}$$

上面的关系式可写为

$$\begin{bmatrix}Y_{11}&Y_{12}&0\\Y_{21}&Y_{22}&Y_{23}\\0&Y_{23}&Y_{33}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}V_1\\V_2\\V_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_1\\-I_2\\-I_3\end{bmatrix} \tag{7-3}$$

式中，$Y_{11}=y_{12}$，$Y_{12}=-y_{12}$，$Y_{21}=-y_{12}$，$Y_{22}=y_{12}+y_{23}$，$Y_{23}=-y_{23}$，$Y_{32}=-y_{23}$，$Y_{33}=y_{23}$。

矩阵方程式（7-3）代表了母线的导纳矩阵；它也是例 7.2 的 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$（母线导纳）模型。

$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵可表示为

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{Bus}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}\cdot\boldsymbol{V}_{\mathrm{Bus}} \tag{7-4}$$

如果系统有 n 条母线，则 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{Bus}}$是 $n\times1$ 电流注入矢量，$\boldsymbol{V}_{\mathrm{Bus}}$是 $n\times1$ 电压矢量，$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$是 $n\times n$ 矩阵。

例 7.2 有 3 条母线，因此 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵是 3×3 的，如式（7-3）和式（7-4）所示。

下面继续讨论有 n 条母线的电网的一般情况。对于每条母线 k，有

$$S_k=V_kI_k^* \quad k=1,2,\cdots,n \tag{7-5}$$

I_k 是从母线 k 注入电网的电流。因此，从 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵的第 k 行，有

$$I_k=\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}V_j \tag{7-6}$$

把式（7-6）代入式（7-5），可得

$$S_k=V_k\left(\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}V_j\right)^* \quad k=1,2,\cdots,n \tag{7-7}$$

对于每条母线 k，可以得到式（7-7）的复数形式的方程。由此可得到 n 个复数非线性方程。

$$\begin{aligned}P_k&=\mathrm{Re}\left\{V_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^*V_j^*\right\}\\Q_k&=\mathrm{Im}\left\{V_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^*V_j^*\right\}\end{aligned} \tag{7-8}$$

$$\begin{aligned}P_k&=V_k\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{kj}\cos\theta_{kj}+B_{kj}\sin\theta_{kj})\\Q_k&=V_k\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{kj}\sin\theta_{kj}-B_{kj}\cos\theta_{kj})\end{aligned} \tag{7-9}$$

式中，

$$Y_{kj}=G_{kj}+\mathrm{j}B_{kj},\theta_{kj}=\theta_k-\theta_j$$
$$V_j=V_j(\cos\theta_j+\mathrm{j}\sin\theta_j)$$
$$V_k=V_k(\cos\theta_k+\mathrm{j}\sin\theta_k)$$

例 7.2 中，$n=3$，所以可以得到 6 个非线性方程。然而，因为电网母线电压的幅值为已知且被用作相位角为零的基准相量，所以实际上得到 4 个非线性方程。

例 7.2 中，已知量还有馈线阻抗（Z_{1-2}和 Z_{2-3}）和负荷（S_2 和 S_3）。为求出母线负荷电压，需要解 V_2、V_3、θ_2 和 θ_3 的 4 个非线性方程。计算完母线电压后，就可以计算当地馈电系统注入的复功率（$S_1=P_1+\mathrm{j}Q_1$）。4 个非线性方程为

$$P_2=V_2\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{2j}\cos\theta_{2j}+B_{2j}\sin\theta_{2j})$$
$$P_3=V_3\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{3j}\cos\theta_{3j}+B_{3j}\sin\theta_{3j})$$
$$Q_2=V_2\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{2j}\sin\theta_{2j}-B_{2j}\cos\theta_{2j})$$
$$Q_3=V_3\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{3j}\sin\theta_{3j}-B_{3j}\cos\theta_{3j})$$

上述表达式代表了电网注入母线的有功功率和无功功率的基本概念。如果知道了母线注入功率，就可以解负荷母线电压。电压计算是电网设计的重要步骤。

应该理解，例 7.2 不同于例 7.1。例 7.1 是不符合实际情况的问题，因为不能指望当地电网在微电网或馈电系统的互联点提供指定的电压。然而，在例 7.2 中，当地电网的母线电压为已知，我们的目标是设计一个能向它的负荷提供额定电压的馈电系统。

7.3　潮流问题

电网设计的基本问题是潮流分析[1-9]。解潮流问题可以确保设计出来的电网能以可接受的电压和频率（可接受的电压指负荷额定电压）向电网负荷配送适当的电能。例如，对于额定值为 50W、120V 的灯泡，给负荷提供的电压应为 120V，正常运行条件下偏差不得超过 5%，事故运行情况下不得超过 10%。如果用标幺值表示，要力求负荷电压为 1pu，偏离范围在 0.95～1.05pu 之内。就是说，一旦规定发电机要满足系统负荷需求，母线电压的解就必须为 1(1±5%)pu。

如果通过负荷控制、频率控制和自动发电控制使系统负荷与发电之间达到秒级平衡，就可以实现可接受的频率要求。对负荷来说，频率对额定值（美国为 60Hz，

世界其他国家为 50Hz）的偏离会给感应电机和水泵等机械负荷带来影响。如果频率下降，感应电动机的速度会下降，导致电动机过热和失效。例如，考虑由几台柴油发电机支持的电力系统。如果由于系统负荷需求过大导致运行频率下降，柴油发电机的冷却泵转速会下降，使柴油发电机冷却不足。过热的柴油发动机会被系统的超限控制系统退出运行，导致电力系统发生级联故障。因此，为维持稳定运行，系统母线负荷电压必须保持为 1pu，在事故运行条件下偏差不得超过 10%。

术语潮流研究和负荷潮流研究可以互换，都是指从发电机组到负荷的功率流。解潮流问题就是“系统模型、发电和负荷计划为已知，求负荷母线电压”。

7.4　作为电力系统工程工具的潮流研究

如上节所讨论的，电网设计必须为电网的负荷提供额定电压。需要根据预计的输电系统、预计的发电系统和预计的母线负荷计算母线电压。在电网系统规划中，电网需要根据预期的未来负荷规划。潮流研究的主要目标是确定成本较低的具体系统设计是否能使母线电压处于可接受界限内。一般来说，电网规划要进行一系列研究，包括发电规划、输电系统规划和无功功率源规划。规划研究的目的是确保所有电网都运行于它们的运行限值之内，且母线负荷电压处在可接受范围内。

电网运行中，要考虑以下问题。在接下来的 24h 内，对于所有预期母线负荷、输电系统、变压器和发电系统，母线电压都会处于它们的额定限值之内吗？如果一台变压器漏油，该变压器可以退出运行而不影响负荷电压吗？如果突然失掉一条线路，可以在其他线路都不过载的情况下满足电网负荷需求吗？

需要进行电网及运行规划和停电控制的潮流研究以及电力系统优化和稳定研究，以给出必要的答案。以下各节将首先介绍电网的母线类型，进而介绍潮流问题的表述。

7.5　母线类型

潮流问题中定义了几种母线类型。最重要的 3 类母线是负荷母线、发电机母线和平衡母线。图 7-3 画出的是负荷母线。

电力系统母线有 4 个变量，它们是母线的有功功率、母线的无功功率、电压幅值和相位。对于负荷母线来说，某个时间的有功功耗和无功功耗是作为预期负荷给出的。时间可规定为提前预测峰荷那一天。如果系统是提前 10 年规划的，则将该预测负荷用于母线。

图 7-4 画出的是发电机母线。这类母线被称为恒压控制母线（P-V 母线）。

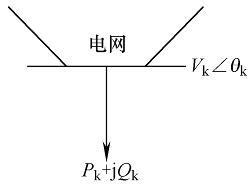


图 7-3　负荷母线

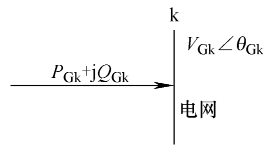


图 7-4　恒压控制（P-V）母线

P-V 母线用于模拟发电机母线。对这类母线，除母线电压幅值外，还给出了相连发电机注入母线的功率。注入电网的无功功率和相位必须通过解潮流问题算得。然而，无功功率必须处于 P-V 母线可提供的范围内（从最小值到最大值）。

图 7-5 画出的是恒功率（P_G-Q_G）母线。这类母线代表注入电网的有功功率和无功功率为已知的发电机。然而，发电机电压幅值和相位必须通过解潮流问题计算。

图 7-6 是平衡母线㊀，也称松弛母线。这类母线与 P-V 母线相同，但母线电压设置为 1pu，相位角设置为零。对于平衡母线，净注入电网的有功功率和无功功率是未知的。连接到平衡母线的发电机称为平衡发电机或松弛发电机。平衡母线的功能是用发出的净注入功率平衡功耗和功率损失。平衡母线也可以视为无穷大母线，即它在理论上可以提供无穷大功率。因此，平衡母线可视为理想电压源：它可以在提供无穷大功率的同时保持电压恒定。注意，上述所有定义的含义都是相同的，可以互换使用。

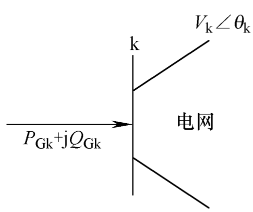


图 7-5　恒功率（P_G-Q_G）母线

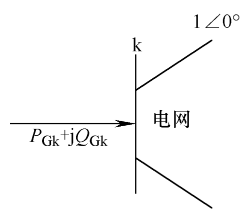


图 7-6　平衡母线（松弛母线）

现在考虑 PV 电站或风力发电站的微电网母线类型。从太阳或风捕捉到的能量是免费的，所以这些类型的机组是用来生产有功功率的。这意味着 PV 母线和风电场母线在功率因数为 1 的条件下运行。因此，PV 母线和风电场母线可以模拟如图 7-7。

图 7-7 画出了微电网接入当地电网时 PV 电站或风电场与母线连接的模拟情

㊀ 译者注：平衡母线，原文为 swing bus，意为“摇摆母线”，此处按我国的习惯叫法译为“平衡母线”。

况。这一模型中，在进行微电网电压分析时，PV 电站或风电场母线发出的有功功率是已知的，且发出的无功功率假定为零。母线电压和相位通过解潮流问题算得，但应处于 PV 电站或风电场的调制比规定的最大和最小限值之间。因此，对于 PV 母线 k，P_{Gk}和 $V_{min} < V_k < V_{max}$是确定的。同时，PV 或风电机组应提供的无功功率必须在发电站的限值（最小值和最大值）之内。

现在考虑微电网从当地电网解列的情况。这种情况下，局部微电网必须控制它的频率和母线电压。当 PV 和风电系统的微电网脱离当地电网时，PV 或风电母线可模拟如图 7-8。

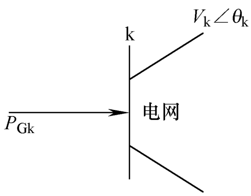


图 7-7　PV 电站或风电场的母线模型

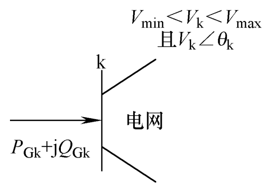


图 7-8　PV 或风电母线模型

上述模型中，母线电压幅值的最大值和最小值由逆变器的调制比确定；发出的有功功率和无功功率也要确定。相位和电压幅值通过解潮流问题计算。然而，不带储能系统的 PV 电站对无功功率的控制能力非常有限。储能系统对逆变器的功率因数控制非常重要。使逆变器和它的储能支持系统能像汽轮机那样运行，能提供有功功率和无功功率，正是人们正在进行的建模和逆变器控制建模研究的课题。对于风电场与微电网直接联网的情况，无功功率注入控制局限于相连母线可接受电压范围内。

为使孤立微电网运行于稳定频率和电压下，必须使它的负荷与发电全时平衡。因为负荷变化是持续的，而可再生能源是间歇的，所以必须有储能系统和/或快速启动电源，如高速微型汽轮机、热电联产发电机等，作为微电网发电构成的一部分。

读者可以复读一下第 4 章，研究电网稳定运行需要考虑的因素。

在潮流问题中，电网的所有母线都要标出名称。一般来说，负荷母线模拟为恒功率模型，它的有功功率 P 和无功功率 Q 是给定的，母线电压需要由计算得出。假定流向负荷的潮流表示为注入电网的负值。发电机母线可模拟为 P_G 和 Q_G 恒定的母线或 PV 母线。发电机把代数正值的有功功率和无功功率注入电力系统网络。潮流问题表述关注的是注入电网的功率；发电机内阻抗不包括在电力系统模型中。然而，对于短路研究来说，系统模型需把发电机内阻抗包括在内。内阻抗会限制发电机产生的故障电流。对于可能的潮流，必须一直保持系统负荷与发电之间的平衡。这种平衡可表示为

$$\sum_{k=1}^{n_1} P_{\mathrm{Gk}} = \sum_{k=1}^{n_2} P_{\mathrm{Lk}} + P_{\text{损耗}} \tag{7-10}$$

式中，P_{Gk}是发电机 k 发出的有功功率；P_{Lk}是负荷 k 消耗的有功功率；n_1 是系统发电机的数量；n_2 是系统负荷的数量。同样

$$\sum_{k=1}^{n_1} Q_{\mathrm{Gk}} = \sum_{k=1}^{n_2} Q_{\mathrm{Lk}} + Q_{\text{损耗}} \tag{7-11}$$

式中，Q_{Gk}是发电机 k 发出的无功功率；Q_{Lk}是负荷 k 消耗的无功功率；n_1 是系统发电机的数量；n_2 是系统负荷的数量。

考虑图 7-9 画出的系统。需要让该三母线电力系统的负荷与发电平衡。

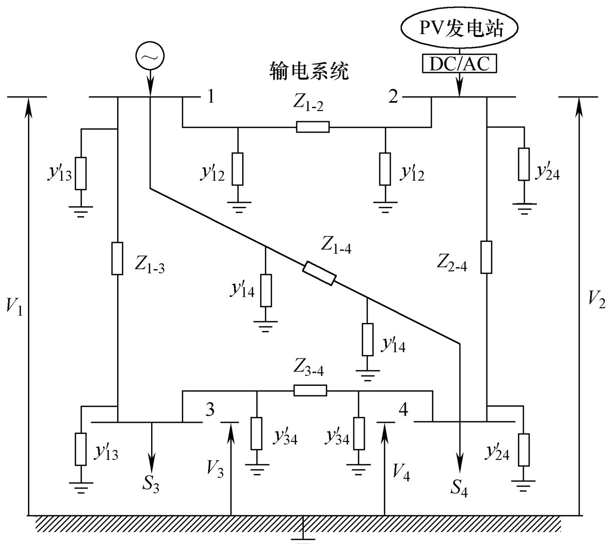


图 7-9　一个三母线微电网系统的示意图

$$P_{\mathrm{G1}} + P_{\mathrm{G2}} = P_{\mathrm{L4}} + P_{\mathrm{L3}} + P_{\text{损耗}}$$

$$P_{\mathrm{G1}} + P_{\mathrm{G2}} - P_{\mathrm{L4}} - P_{\mathrm{L3}} - P_{\text{损耗}} = 0 \tag{7-12}$$

$$Q_{\mathrm{G1}} + Q_{\mathrm{G2}} = Q_{\mathrm{L4}} + Q_{\mathrm{L3}} + Q_{\text{损耗}}$$

$$Q_{\mathrm{G1}} + Q_{\mathrm{G2}} - Q_{\mathrm{L4}} - Q_{\mathrm{L3}} - Q_{\text{损耗}} = 0 \tag{7-13}$$

上述公式中，假定感性负荷消耗的无功功率 $Q_{\mathrm{ind}} > 0$，而容性负荷供给的无功功率 $Q_{\mathrm{cap}} < 0$。

为保证负荷与发电之间的平衡，还必须计算有功和无功功率损耗。然而，计算功率损耗需要知道母线电压。母线电压是需要从潮流公式计算的未知数。这一问题可通过定义一个电网母线，即前面说的平衡母线和它连接的平衡发电机来求解。根据定义，平衡母线是一个理想电压源。作为理想电压源，它既可以提供有功功率，也可以提供无功功率，同时又保持母线电压不变。因此，在潮流问题表述中，平衡

发电机是一个无穷大有功功率和无功功率源。平衡母线电压设为 1pu，因为它是基准相量，所以相位角设置为零，即 $V_s = 1\angle 0°$。按照这种配置，接到平衡母线上的发电机可以向电网负荷提供需要的功率，而它的电压不会产生波动。当然，实际上这种功率无穷大的恒压源是不存在的。然而，如果接入的负荷与母线功率相比非常小，则它可以近似为理想电压源。平衡母线可以使系统负荷加系统损耗与系统发电功率达到平衡，从而使网络中的能量平衡得到保证。

7.6　潮流问题的一般性表述

现在来说明电网的一个网络中的相同问题。要记住以下前提：

1）发电机提供三相平衡电压。

2）输电线路是平衡的。

3）负荷也假定是平衡的。

4）PV 或风力发电站用 PV 母线表示，母线电压有最大和最小限值。

考虑图 7-10 给出的电网注入模型。

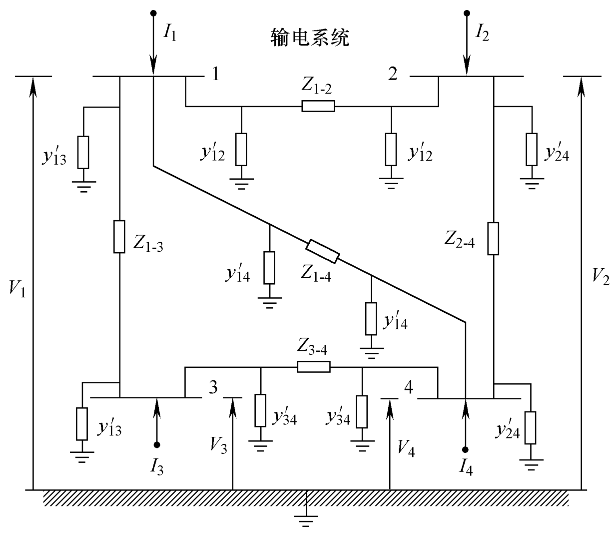


图 7-10　潮流研究使用的电流注入模型

图 7-10 中，每条母线的注入电流根据已知的注入功率和由系统数学模型算得的母线电压表示。

图 7-10 中，使用了以下规定：

1）母线电压是实际的母线对地电压标幺值。

2）母线电流是从发动机和负荷流入输电系统的净注入电流标幺值。

3）所有电流规定的正方向是流向它们相应的母线。这意味着所有发电机都注

入正电流，而所有负荷都注入负电流。

4）Z_{i-j}是单相本源阻抗，也称为母线 i 与母线 j 之间的正序阻抗。下一章将讨论相序阻抗。然而，正序阻抗与本书中一直使用的平衡线路阻抗是同一个东西。y'_{ij}是母线 i 与母线 j 之间的对地导纳的一半。

线路的串联本源阻抗用它们相应的本源导纳形式表示：

$$y_{12}=1/Z_{1-2};y_{13}=1/Z_{1-3};y_{14}=1/Z_{1-4};y_{24}=1/Z_{2-4};y_{34}=1/Z_{3-4} \qquad (7\text{-}14)$$

因此图 7-10 的电力系统可改画为图 7-11。

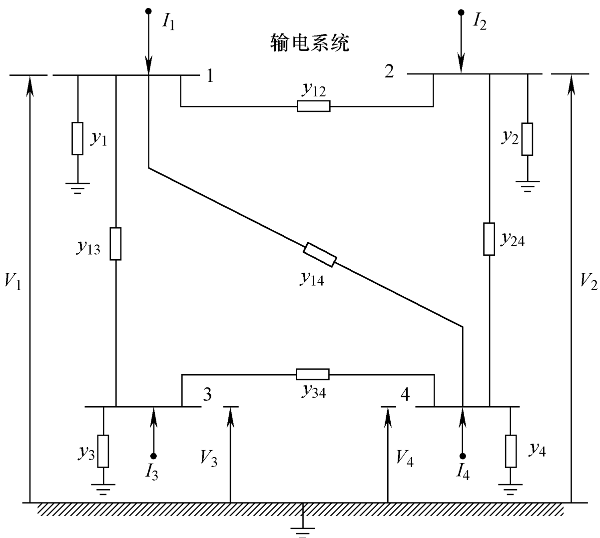


图 7-11　用导纳表示的电流注入模型

图中，

- $y_1=y'_{12}+y'_{13}+y'_{14}$：连到母线 1 的总导纳
- $y_2=y'_{12}+y'_{24}$：连到母线 2 的总导纳
- $y_3=y'_{13}+y'_{34}$：连到母线 3 的总导纳
- $y_4=y'_{14}+y'_{24}+y'_{34}$：连到母线 4 的总导纳

地母线设为基准母线，对每条母线（节点）应用基尔霍夫电流定律可得

$$\begin{aligned}
I_1&=V_1y_1+(V_1-V_2)y_{12}+(V_1-V_3)y_{13}+(V_1-V_4)y_{14}\\
I_2&=V_2y_2+(V_2-V_1)y_{12}+(V_2-V_4)y_{24}\\
I_3&=V_3y_3+(V_3-V_1)y_{13}+(V_3-V_4)y_{34}\\
I_4&=V_4y_4+(V_4-V_1)y_{14}+(V_4-V_2)y_{24}+(V_4-V_3)y_{34}
\end{aligned} \qquad (7\text{-}15)$$

式（7-15）可改写为

$$I_1=V_1(y_1+y_{12}+y_{13}+y_{14})+V_2(-y_{12})+V_3(-y_{13})+V_4(-y_{14})$$

$$I_2=V_1(-y_{12})+V_2(y_2+y_{12}+y_{24})+V_3(0)+V_4(-y_{24})$$

$$I_3 = V_1(-y_{13}) + V_2(0) + V_3(y_3 + y_{13} + y_{34}) + V_4(-y_{34}) \tag{7-16}$$
$$I_4 = V_1(-y_{14}) + V_2(-y_{24}) + V_3(-y_{34}) + V_4(y_4 + y_{14} + y_{24} + y_{34})$$

它的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \tag{7-17}$$

式中，

$$Y_{11} = y_1 + y_{12} + y_{13} + y_{14}; Y_{12} = -y_{12}; Y_{13} = -y_{13}; Y_{14} = -y_{14}$$
$$Y_{21} = Y_{12}; Y_{22} = y_2 + y_{12} + y_{24}; Y_{23} = 0; Y_{24} = -y_{24}$$
$$Y_{31} = Y_{13}; Y_{32} = Y_{23}; Y_{33} = y_3 + y_{13} + y_{34}; Y_{34} = -y_{34}$$
$$Y_{41} = Y_{14}; Y_{42} = Y_{24}; Y_{43} = Y_{34}; Y_{44} = y_4 + y_{14} + y_{24} + y_{34}$$

7.7　母线导纳模型

可以把母线导纳矩阵的表述规格化。这种表述被称为“算法”[10]。算法指用有限步骤顺序解题的方法。公元 825 年，波斯天文学家、数学家花剌子密（Al-Khwārizmī）写了一部题为“论用印度数字计算”的著作。他的这一著作在 12 世纪被译为拉丁文，题为“Algorithmi de Numero Indorum”。单词“algebra（代数）”和“algorithm（算法）”就是从花剌子密的著作中得来的[10]。后来，著名诗人、数学家和天文学家欧玛尔·海亚姆（Omar Khayyam）（1048—1122）[11]撰写了题为“代数问题演示”的著作（1070），奠定了代数的基本原理。他还开发了求取任意高阶多项式根的算法[10]。从 825 年起，算法（algorithm）一词被数学家们用来表述和求解复杂问题。这里说明求 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵的算法和解潮流问题。

$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵的元素可用以下算法计算。

第 1 步，如果 $i=j$，则 $Y_{ii} = \sum y$，即接到母线 i 的所有导纳之和。

第 2 步，如果 $i \neq j$，且母线 i 与母线 j 互不相连，则元素 $Y_{ij} = 0$。

第 3 步，如果 $i \neq j$，且母线 i 与母线 j 通过导纳 y_{ij}互联，则元素 $Y_{ij} = -y_{ij}$。

（7-18）

上述算法很容易编程对环绕美国东部电网的潮流问题求解。

对母线注入电流矢量，可以用更简洁的形式，即母线导纳矩阵和母线电压矢量来表示：

$$[\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}] = [\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}][\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}]$$

式中，$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}$为母线注入电流矢量；$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$为母线导纳矩阵；$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}$为母线电压分布矢量。

电网的 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵模型是稀疏对称复数矩阵。它对应每条母线的一行的和（或一

列的和）等于对基准母线的导纳。如果与基准母线没有互联，则每行的和为零。这种情况下，$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵是奇异矩阵，且 $\det[\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}]=0$，这种矩阵是不可逆的。

应该记得，如果在短路研究中表示 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵模型，应该把发电机和电动机的内阻抗包括在内。然而，对潮流研究，用注入模型表示电网。还应该注意到，一般情况下，电网通常是通过输电线电容接地的。

7.8　母线阻抗矩阵模型

由图 7-11 可以看出，母线注入电流是通过母线导纳矩阵与母线电压相关联的，它们的关系如下：

$$[\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}]=[\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}][\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}] \tag{7-19}$$

$$[\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}]=[\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}][\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}]$$

$$[\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}]=[\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}]^{-1} \tag{7-20}$$

因此，$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$矩阵是 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵的逆矩阵。现在母线电压矢量是用母线阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$表示的，而 $\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}$是母线注入电流矢量。

对于图 7-11 的系统，式（7-20）的阻抗矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \tag{7-21}$$

例 7.3　对于图 7-12 的电网，计算母线导纳和母线阻抗模型。

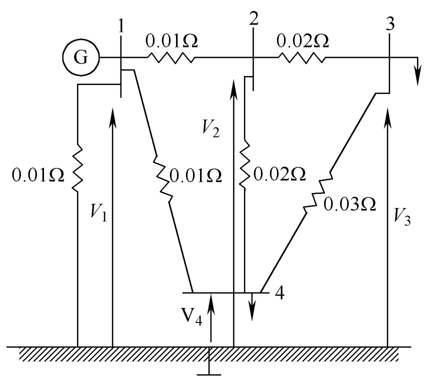


图 7-12　例 7.3 的电网

解

导纳矩阵可按式（7-16）计算。

$$Y_{11}=y_1+y_{12}+y_{14}=\frac{1}{0.01}+\frac{1}{0.01}+\frac{1}{0.01}=300,Y_{12}=-y_{12}=-\frac{1}{0.01}=-100,$$

$$Y_{14}=-y_{14}=-\frac{1}{0.01}=-100,Y_{21}=-y_{21}=-\frac{1}{0.01}=-100,$$

$$Y_{22}=y_{12}+y_{23}+y_{24}=\frac{1}{0.01}+\frac{1}{0.02}+\frac{1}{0.02}=200,Y_{23}=-y_{23}=-\frac{1}{0.02}=-50,$$

$$Y_{24}=-y_{24}=-\frac{1}{0.02}=-50,Y_{32}=-y_{23}=-\frac{1}{0.02}=-50,$$

$$Y_{33}=y_{32}+y_{34}=\frac{1}{0.02}+\frac{1}{0.03}=83.33,Y_{34}=-y_{34}=-\frac{1}{0.03}=-33.33,$$

$$Y_{41}=-y_{14}=-\frac{1}{0.01}=-100,Y_{42}=-y_{24}=-\frac{1}{0.02}=-50,$$

$$Y_{43}=-y_{34}=-\frac{1}{0.03}=-33.33,$$

$$Y_{44}=y_{41}+y_{42}+y_{43}=\frac{1}{0.01}+\frac{1}{0.02}+\frac{1}{0.03}=183.33$$

如果两母线之间没有互联，则相应的导纳矩阵元素为零。所以

$$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14}\\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24}\\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34}\\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}300 & -100 & 0 & -100\\ -100 & 200 & -50 & -50\\ 0 & -50 & 83.33 & -33.33\\ -100 & -50 & -33.33 & 183.33\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}=\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}^{-1}=\begin{bmatrix}0.010 & 0.010 & 0.010 & 0.010\\ 0.010 & 0.017 & 0.015 & 0.013\\ 0.010 & 0.015 & 0.027 & 0.015\\ 0.010 & 0.013 & 0.015 & 0.017\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$是例 7.3 电网的母线阻抗模型。

7.9 潮流问题表述

考虑图 7-11 表示的电网。潮流问题可用母线导纳矩阵以数学方式表述。

$$[\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}]=[\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}][\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}] \tag{7-22}$$

注入电流矢量表示净注入，其中发电机注入电流为代数正值，而负荷注入为负值。因此，如果母线连接的发电量大于连接的负荷，则它对电网的净注入为正。反之，如果母线连接的负荷大于发电功率，则净注入为负。因此，对于每条母线 k，有

$$S_k=V_kI_k^* \quad k=1,2,\cdots,n \tag{7-23}$$

式中，I_k 是母线 k 注入电网的电流。所以，对 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵的第 k 行，有

$$I_k = \sum_{j=1}^{n} Y_{kj} V_j \tag{7-24}$$

把式（7-24）带入式（7-23），可得

$$S_k = V_k \left(\sum_{j=1}^{n} Y_{kj} V_k \right)^* \quad k = 1,2,\cdots,n \tag{7-25}$$

对于每条母线 k，可导出式（7-25）的复数表达式。由此可得到 n 个非线性复数方程式：

$$Y_{kj} = G_{kj} + \mathrm{j}B_{kj}, \theta_{kj} = \theta_k - \theta_j$$

$$V_j = V_j(\cos\theta_j + \mathrm{j}\sin\theta_j)$$

$$V_k = V_k(\cos\theta_k + \mathrm{j}\sin\theta_k)$$

$$I_k^* = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* = \frac{(P_k + \mathrm{j}Q_k)^*}{V_k^*} = \frac{P_k - \mathrm{j}Q_k}{V_k \cdot \angle -\theta_k}$$

式中，n 是电网的母线总数。

从导纳矩阵模型可得到注入电网的电流关系，因为它与网络的导纳模型相关，而且可以根据母线电压知道输电系统的潮流。因此，对于每条母线 k，可以得到基于母线导纳模型的如下表达式。

$$\frac{P_1 - \mathrm{j}Q_1}{V_1^*} = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \tag{7-26}$$

$$\frac{P_2 - \mathrm{j}Q_2}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \tag{7-27}$$

$$\frac{P_3 - \mathrm{j}Q_3}{V_3^*} = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \tag{7-28}$$

$$\frac{P_4 - \mathrm{j}Q_4}{V_4^*} = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \tag{7-29}$$

可以把式（7-26）～式（7-29）改写为

$$\begin{aligned}
P_1 - \mathrm{j}Q_1 &= Y_{11}V_1^2 + Y_{12}V_1^* V_2 + Y_{13}V_1^* V_3 + Y_{14}V_1^* V_4 \\
P_2 - \mathrm{j}Q_2 &= Y_{21}V_1V_2^* + Y_{22}V_2^2 + Y_{23}V_2^* V_3 + Y_{24}V_2^* V_4 \\
P_3 - \mathrm{j}Q_3 &= Y_{31}V_1V_3^* + Y_{32}V_2V_3^* + Y_{33}V_3^2 + Y_{34}V_3^* V_4 \\
P_4 - \mathrm{j}Q_4 &= Y_{41}V_1V_4^* + Y_{42}V_2V_4^* + Y_{43}V_3V_4^* + Y_{44}V_{44}^2
\end{aligned} \tag{7-30}$$

上述方程组是非线性的复数方程。如已经说明的，系统的一条母线被选为平衡母线，它的电压幅值设为 1pu；作为基准相量，它的相位角设为零。平衡母线将确保系统负荷与发电之间的平衡。在潮流问题中，负荷母线电压是未知变量，所有注入功率为已知变量。这里有 3 个解母线负荷电压的非线性复数方程。

如前面的讨论所述，一般来说，对每条母线 k，它的复数方程可写成两个用实数表示的方程。把上述表达式写成一般性表述，有

$$P_k = V_k \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{kj}\cos\theta_{kj} + B_{kj}\sin\theta_{kj})$$

$$Q_k = V_k \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{kj}\sin\theta_{kj} - B_{kj}\cos\theta_{kj})$$

式中，

$$Y_{kj} = G_{kj} + \mathrm{j}B_{kj}, \theta_{kj} = \theta_k - \theta_j$$

$$V_k = V_k(\cos\theta_k + \mathrm{j}\sin\theta_k)$$

$$V_j = V_j(\cos\theta_j + \mathrm{j}\sin\theta_j)$$

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* = \frac{P_k - \mathrm{j}Q_k}{V_k^*} = \frac{P_k - \mathrm{j}Q_k}{V_k \cdot \angle -\theta_k}$$

如果系统有 n 条母线，则上述方程式可写成 $2n$ 个方程式：

$$\begin{aligned} &f_1(V_1 \cdots\cdots\cdots\cdots V_n, \theta_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \theta_n) = 0 \\ &f_2(V_1 \cdots\cdots\cdots\cdots V_n, \theta_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \theta_n) = 0 \\ &f_n(V_1 \cdots\cdots\cdots\cdots V_n, \theta_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \theta_n) = 0 \\ &f_{2n}(V_1 \cdots\cdots\cdots\cdots V_n, \theta_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \theta_n) = 0 \end{aligned} \tag{7-31}$$

这 $2n$ 个方程式可表示为

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{2n}(x) \end{bmatrix} \tag{7-32}$$

式中，矢量 $\boldsymbol{X}$ 的元素代表电压的幅值和相位。方程组（7-32）有 $2n$ 个待解非线性方程，矢量 $\boldsymbol{X}$ 可表示为

$$\begin{aligned} [\boldsymbol{X}]^{\mathrm{T}} &= [V_1, \cdots\cdots\cdots\cdots V_n, \theta_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \theta_n] \\ &= [x_1, \cdots\cdots\cdots\cdots x_n, x_{n+1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots x_{2n}] \end{aligned}$$

7.10　母线导纳的高斯-赛德尔法

高斯-赛德尔（Gauss-Seidel）算法是一个迭代过程。这种方法的目标是通过重复逼近满足一组非线性方程。当所有非线性方程都以可接受的精度得到满足，则方程组得解。对于潮流问题，当所有母线电压都收敛于 1pu，偏差小于额定电压的 5%，且所有非线性方程都在可接受误差范围内得到满足，则方程组得解。

我们重申，潮流问题的主方程为

$$V_1 = 1\angle 0° \tag{7-33}$$

$$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Y}_{\text{Bus}} \cdot \boldsymbol{V}_{\text{Bus}} \tag{7-34}$$

$$S_k = V_k I_k^* \tag{7-35}$$

式中，$k=1, 2, 3, \cdots, n$。

式（7-33）是平衡母线（也称松弛母线）模型，它通过系统传输损耗使系统负荷与系统发电保持平衡。当微电网接入当地电网时，选电网母线为平衡母线；这可以保证负荷、当地发电和损耗之间保持平衡。如果微电网发电不足，则平衡由电网母线维持。如果微电网发电过剩，则通过功率注入电网的方法维持平衡。式（7-34）描述的是对于一组母线电压来说电流或功率流过输电线路的情况。式（7-35）表示的是系统的每条母线注入的净功率。

$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$的高斯-赛德尔法流程如图 7-13 所示。

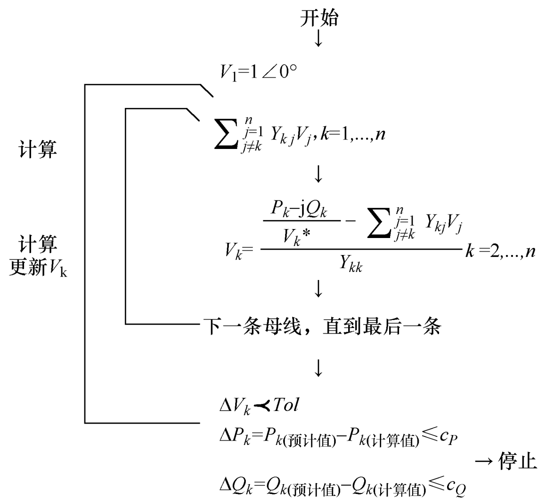


图 7-13　迭代逼近的高斯-赛德尔法

在高斯-赛德尔法中，反复解用式（7-31）表示的基本潮流方程。

$$V_k = \frac{\dfrac{P_k - \mathrm{j}Q_k}{V_k^*} - \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n} Y_{kj} V_j}{Y_{kk}} \quad k = 2, \cdots, n \tag{7-36}$$

式（7-36）代表负荷母线电压，其电网用母线导纳矩阵表示。计算电压逼近的母线的对角线元素出现在分母中。因为母线导纳矩阵的对角线元素从不为零，所以可以保证母线电压的逼近计算可以持续。如果电网设计正确，就可以达到收敛。

式（7-37）核对是否可以用最后的母线电压近似值满足初始非线性负荷潮流公式。

$$\Delta P_k = P_{k(\text{预计值})} - P_{k(\text{计算值})} \leqslant c_P$$
$$\Delta Q_k = Q_{k(\text{预计值})} - Q_{k(\text{计算值})} \leqslant c_Q \tag{7-37}$$

例 7.4　对于图 7-14 的系统，使用 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$的高斯-赛德尔法求解母线电压。

对于图 7-14 的例子，母线 1 是平衡母线，其电压为 $V_1 = 1\angle 0°$。母线 2 的预计功率为 1.2pu。母线 3 的负荷为 1.5pu。计算母线 2 和母线 3 的电压。

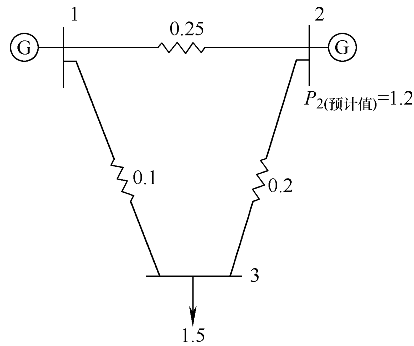


图 7-14　例 7.4 的单线图

解

要求解上述问题，需要写出母线导纳矩阵。

$$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}=\begin{bmatrix} 14 & -4 & -10 \\ -4 & 9 & -5 \\ -10 & -5 & 15 \end{bmatrix}$$

潮流模型为

$$V_1=1\angle 0°$$

$$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}=\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}\cdot\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$$

直流系统只有有功潮流。

$$I_k^*=I_k, V_k^*=V_k$$

$$S_k=V_k\cdot I_k^*=V_kI_k=P_k, 且\ Q_k=0$$

因此，对母线 2，有

$$1.2=V_2I_2$$

对母线 3，有

$$-1.5=V_3I_3$$

对于 $i=0$，可假定母线 2 和母线 3 的电压都是 1pu，并开始迭代逼近。

$$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}^{(0)}=\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

对母线 2，有

$$\sum_{\substack{j=1\\j\neq 2}}^{3} Y_{2j}V_j = Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 = (-4)(1)+(-5)(1)$$

然后更新 V_2

$$V_2 \frac{\dfrac{P_2-\mathrm{j}Q_2}{V_2}-\sum\limits_{\substack{j=1\\j\neq 2}}^{n} Y_{2j}V_j}{Y_{22}} \quad i=1,\cdots\cdots,j\neq i$$

$$V_2=\frac{1}{Y_{22}}\left[\frac{1.2}{V_2}-\{(-4)(1.0)+(-5)(1)\}\right]$$

更新后的母线 2 电压为

$$V_2^{(1)}=\frac{1}{9}\left[\frac{1.2}{1}+4+5\right]=1.1333\text{pu}$$

继续迭代过程并更新母线 3 电压。

$$\sum_{\substack{j=1\\j\neq 3}}^{3} Y_{3j}V_j = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2$$

更新母线 3 电压 V_3

$$V_3 = \frac{1}{Y_{33}}\left[\frac{-1.5}{V_3} - [Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2]\right]$$

$$V_3 = \frac{1}{15}\left[\frac{-1.5}{1.0} - \{(-10)(1) + (-5)(1.1333)\}\right]$$

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{15}[-1.5 + 10 + 5.666] = \frac{14.1666}{15} = 0.9444\text{pu}$$

通过计算母线 2 和母线 3 的偏差来继续进行逼近计算。

母线 2 的偏差为

$$P_{2(\text{计算值})} = \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq 2}}^{3} V_2 I_{2j}$$

$$P_{2(\text{计算值})} = V_2 I_{20} + V_2 I_{21} + V_2 I_{23}$$

$$P_{2(\text{计算值})} = 0 + 1.1333\left(\frac{V_2 - V_1}{0.25}\right) + 1.333\left(\frac{V_2 - V_3}{0.2}\right)$$

$$P_{2(\text{计算值})} = 0 + 1.1333\left(\frac{1.1333 - 1.0}{0.25}\right) + 1.1333\left(\frac{1.1333 - 0.944}{0.2}\right) = 1.6769$$

$$\Delta P_2 = P_{2(\text{预计值})} - P_{2(\text{计算值})} = 1.2 - 1.6769$$

$$\Delta P_2 = -0.4769\text{pu}$$

母线 3 的偏差为

$$P_{3(\text{计算值})} = \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq 3}}^{3} V_3 I_{3j}$$

$$P_{3(\text{计算值})} = V_3 I_{30} + V_3 I_{31} + V_3 I_{32}$$

$$P_{3(\text{计算值})} = 0 + 0.944\left(\frac{V_3 - V_1}{0.1}\right) + 0.944\left(\frac{V_3 - V_2}{0.2}\right)$$

$$P_{3(\text{计算值})} = 0.944\left(\frac{0.944 - 1.0}{0.1}\right) + 0.944\left(\frac{0.944 - 1.1333}{0.2}\right) = -1.4221$$

$$\Delta P_3 = P_{3(\text{预计值})} - P_{3(\text{计算值})} = -1.5 - (-1.4221)$$

$$\Delta P_3 = -0.0779\text{pu}$$

继续进行上述过程，直至误差减少到满意值。经过 7 次迭代后，得到 $c_p = 1 \times 10^{-4}$的结果。计算结果见表 7-1。

表 7-1　例 7.4 的计算结果

母 线 编 号	电压（pu）	功率偏差（pu）
2	1.078	0.63×10^{-4}
3	0.917	0.28×10^{-4}

母线 1（平衡母线）提供的功率等于总负荷减去其他母线的总发电功率加损耗。

$$P_1 = V_1 I_1 = V_1 \sum_{j=1}^{3} Y_{1j} V_j = V_1 (Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3)$$

平衡母线的电压为 $1\angle 0°$，该母线注入的功率标幺值为 $P_1 = 0.522\text{pu}$。

输电线的总功率损耗为 0.223pu。

7.11　母线阻抗的高斯-赛德尔法

在 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$ 的高斯-赛德尔法中[6]，因为平衡母线定义为 $V_1 = 1\angle 0°$，所以潮流问题可表示为

$$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Z}_{\text{Bus}} \boldsymbol{I}_{\text{Bus}}$$

$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$确定了通过输电系统的潮流。

$$S_k = V_k \cdot I_k^*$$

$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$定义了注入模型。

$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$的高斯-赛德尔法如图 7-15 所示。

例 7.5　考虑图 7-16 表示的系统。用 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$的高斯-赛德尔法求母线电压。

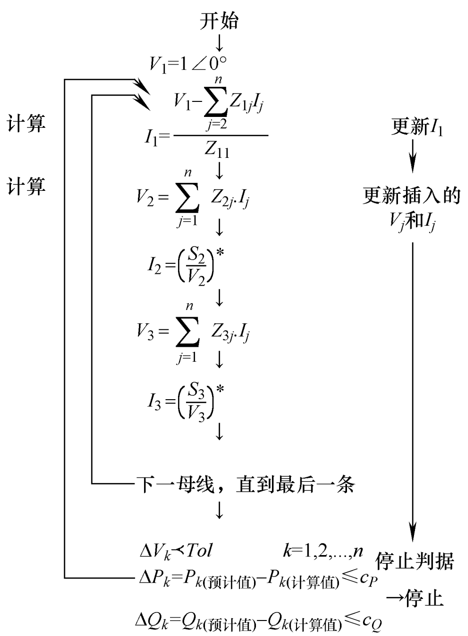


图 7-15　母线阻抗的高斯-赛德尔法

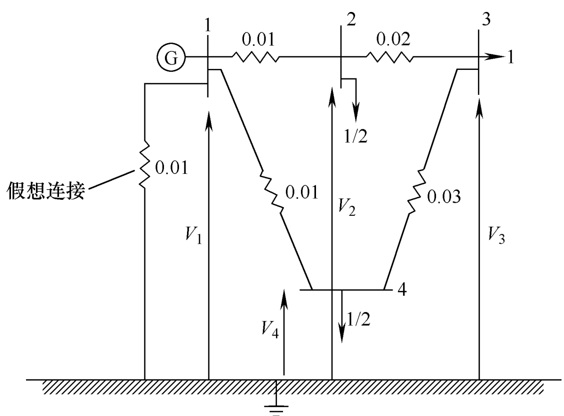


图 7-16　例 7.5 的单线图

母线 1 是平衡母线，其电压设定为 $V_1 = 1\angle 0°$。

如果没有假想对地连线，就无法定义 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$。在求解时，平衡母线是接地的，它吸取的功率要考虑在内。这一对地连接选择与线路阻抗相同的数量级。注入功率为

$S_2 = -1/2$，$S_3 = -1$，$S_4 = -1/2$。所有数据都用标幺值表示。

解

对于地母线的 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$ 为

$$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.0186 & 0.0157 & 0.0114 \\ 0.01 & 0.0157 & 0.0271 & 0.0143 \\ 0.01 & 0.0114 & 0.0143 & 0.0186 \end{bmatrix}$$

潮流问题可表示为

$$V_1 = 1\angle 0°$$

$$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}$$

直流系统只有有功潮流。

$$S_k = V_k \cdot I_k^* = V_k I_k = P_k, Q_K = 0$$

母线负荷和发电功率可表示为

$$-0.5 = V_2 I_2$$

$$-1.0 = V_3 I_3$$

$$-0.5 = V_4 I_4$$

第一步是计算母线电压和电流的如下高斯零迭代值。

$$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{I}_{\text{Bus}}^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

对于 $\boldsymbol{V}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}$ 的第一行，进行如下计算。

更新 I_1

$$I_1 = \frac{V_1 - \sum_{j=2}^{n} Z_{1j} I_j}{Z_{11}} = \frac{1-0}{0.01} = 100 \quad n = 4$$

更新 V_2

$$\begin{aligned} V_2 &= \sum_{j=1}^{n} Z_{2j} I_j \\ &= 0.01 \times 100 + 0.0186 \times 0 + 0.0157 \times 0 + 0.0114 \times 0 = 1 \end{aligned}$$

更新 I_2

$$I_2 = \frac{S_2}{V_2} = \frac{-0.5}{1} = -0.5$$

更新 V_3

$$V_3 = \sum_{j=1}^{n} Z_{3j} I_j$$

$$=0.01\times100+0.0157\times(-0.5)+0.0271\times0+0.0143\times0$$
$$=1-0.0078=0.9922$$

更新 I_3

$$I_3=\frac{S_3}{V_3}=\frac{-1}{0.9922}=-1.0079$$

更新 V_4

$$\begin{aligned}V_4&=\sum_{j=1}^{n}Z_{4j}I_j\\&=0.01\times100+0.0114\times(-0.5)+0.0143\times(-1.0079)+0.0168\times0\\&=1-0.0057-0.0144=0.9799\end{aligned}$$

更新 I_4

$$I_4=\frac{S_4}{V_4}=\frac{-0.5}{0.9799}=-0.5102$$

由以上计算可得

$$\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}^{(1)}=\begin{bmatrix}1\\1\\0.9922\\0.9799\end{bmatrix},\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}^{(1)}=\begin{bmatrix}100\\-0.5\\-1.0079\\-0.5102\end{bmatrix}$$

更新 I_1

$$\begin{aligned}I_1&=\frac{1-0.01\times(-0.5)-0.01\times(-1.0079)-0.01\times(-0.5102)}{0.01}\\&=\frac{1.02019}{0.01}=102.019\end{aligned}$$

更新 V_2

$$\begin{aligned}V_2=&0.01\times102.019+0.0186\times(-0.5)+0.0157\times(-1.0079)\\&+0.0114\times(-0.5102)=0.9892\end{aligned}$$

更新 I_2

$$I_2=\frac{S_2}{V_2}=\frac{-0.5}{0.9892}=-0.5055$$

更新 V_3

$$\begin{aligned}V_3=&0.01\times102.019+0.0157\times(-0.5055)+0.0271\times(-1.0079)\\&+0.0143\times(-0.5102)=0.9776\end{aligned}$$

更新 I_3

$$I_3=\frac{S_3}{V_3}=\frac{-1}{0.9776}=-1.023$$

更新 V_4

$$V_4 = \sum_{j=1}^{n} Z_{4j} I_j$$
$$= 0.01 \times 102.019 + 0.0114 \times (-0.5055) + 0.0143 \times (-1.023)$$
$$+ 0.0186 \times (-0.5102) = 0.9903$$

更新 I_4

$$I_4 = \frac{S_4}{V_4} = \frac{-0.5}{0.9903} = -0.5049$$

每条母线 k 的偏差为

$$P_{(计算值)k} = V_k I_k$$
$$\Delta P_k = P_{k(预计值)} - P_{k(计算值)}$$

对于母线 2：

$$P_{2(计算值)} = V_2 I_2$$
$$\Delta P_2 = P_{2(预计值)} - P_{2(计算值)}$$

对于母线 3：

$$P_{3(计算值)} = V_3 I_3$$
$$\Delta P_3 = P_{3(预计值)} - P_{3(计算值)}$$

继续进行上述过程，直至误差减少到满意值。经过 4 次迭代后，得到 $c_p = 1 \times 10^{-4}$的结果。计算结果见表 7-2。

表 7-2　例 7.5 的结果

母 线 编 号	电压（pu）	功率偏差（pu）
2	0.99	0.1306×10^{-5}
3	0.98	0.2465×10^{-5}
4	0.99	0.6635×10^{-5}

如果误差大于满意值，就需要继续进行迭代。

上述例题的 METLAB 仿真平台如下：

```
%Power Flow: Gauss-Seidel method
clc; clear all;
tolerance= 1e-4;
N=4;      % no. of buses
Y=[ 1/.01+1/.01+1/.01   -1/.01      0      -1/.01;
    -1/.01      1/.01+1/.02    -1/.02      0;
     0          -1/.02       1/.02+1/.03   -1/.03;
    -1/.01           0      -1/.03         1/.01+1/.03];
Z=inv(Y)

P_sch=[1 -.5 -1 -.5]'

I=[0 0 0 0]';
```

```
V=[1 0 0 0]';

iteration=0;

while (iteration <= 999)
iteration=iteration+1;
  VZ=0;
  for n=2:N
    VZ=VZ+Z(1,n)*I(n);
  end
  I(1)=(V(1)-VZ)/Z(1,1);
  for m=2:N
    V(m)=Z(m,:)*I;
    I(m)=P_sch(m)/V(m);
  end

  P_calc = V.*(Y*V);
  mismatch=[P_sch(2:N)-P_calc(2:N)];
 if (norm(mismatch,'inf') < tolerance)
   break;
 end
end
P_calc(1)=P_calc(1)-V(1)∧2/.01; % Subtracting the power
                                  of the fictitious branch
iteration
for i = 1:N
 fprintf(1, 'Bus %d:\n', i);
 fprintf(1, '  Voltage = %f p.u\n',V(i));
 fprintf(1, '  Injected P = %f p.u\n', P_calc(i));
end
```

母线 1（平衡母线）提供的功率等于总负荷减去其他母线的总发电功率加损耗。

$$P_1 = V_1 I_1 = V_1 \sum_{j=1}^{3} Y_{1j} V_j = V_1 (Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3)$$

平衡母线的电压为 $1\angle 0°$，它的功率标幺值为 $P_1 = 102.033$pu。

假想连线的功率损耗为$\dfrac{V_1^2}{z_{假想,pu}} = \dfrac{1^2}{0.01} = 100$pu

因此，母线 1 实际注入功率为 $P_1 = 102.033 - 100 = 2.033$pu

输电线的总功率损耗为 0.033pu。

7.12 潮流的母线导纳和母线阻抗解法的比较

对于有 n 条母线的电网，存在 n 个复数非线性方程。完整的 $\boldsymbol{Y}_{Bus}$ 或 $\boldsymbol{Z}_{Bus}$ 矩阵约有 $2n^2$ 个元素。如果所有元素都要存储，那么对于 500 条母线的系统，则存储要求

就是 500000 字。然而，$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$和$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$都是对称矩阵，所以只需存储上半个三角形。于是 500 条母线系统的存储要求就减为 250000 字。$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$矩阵是满矩阵，因为它的元素通常不为零。对于超大型问题来说，它的计算和存储要求是天文数量级的。但另一方面，$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵是稀疏矩阵，因为只有存在直接连接，即输电线或变压器位于母线 k 与 j 之间时，元素 Y_{kj}才是非零的。零元素不必存储。因此，对于大型电力系统问题，利用这种固有的稀疏特性，存储量和计算时间都可以大大减少。$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$应具有严格的对角线优势。对于某些实际电网，这个条件可能不能满足。如果电网含远距离超高压（Extra-High Voltage，EHV）输电线、串联及并联补偿、异常高阻抗或极低串联阻抗、大充电电容的电缆电路，则可能需要很多次迭代。这些系统的 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$对角线元素较弱。解潮流问题时，因为平衡母线电压是已知的，所以相应行和列可以从$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$删除。对于 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$含最小优势对角线元素的电网，可以让平衡母线位于该母线以保证收敛。$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$矩阵法对平衡母线选择通常不太敏感。它的缺点是需要获得、存储和迭代非稀疏母线阻抗矩阵。$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵法的优点是每次迭代的网络存储需求和计算量都较小，大致与母线数量成正比。然而，$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵的缺点是收敛缓慢，且有时可能不收敛。另一方面，$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$法收敛迅速且永远收敛。

7.13　微电网的同步及非同步运行

图 7-17 是一个与当地电网联网的典型微电网。根据微电网发电电源的容量，当地电网可以设计为运行于 480V ~ 20kV 电压等级。显然，在这个微电网，母线 1 必须指定为平衡母线，因为当地电网可供功率比图 7-17 中的微电网系统大很多倍。

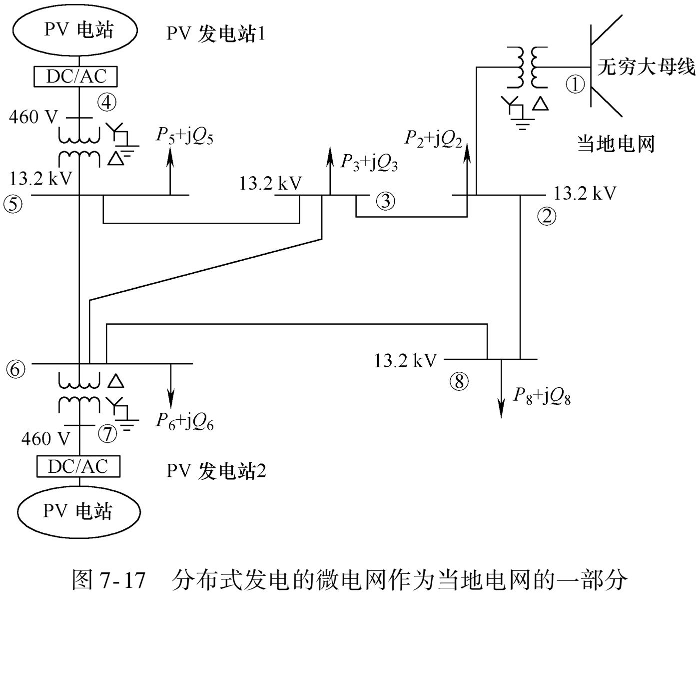


图 7-17　分布式发电的微电网作为当地电网的一部分

图 7-17 的微电网可以有两种运行方式：微电网作为互联系统的一部分运行；一旦与当地电网解列，微电网可以独立运行。微电网作为当地电网一部分运行时，它的负荷、频率控制及电压控制都由当地电网控制中心负责。如第 4 章讨论的，当 PV 或风电的微电网连到当地电网时，整个系统运行于单一频率。电网母线电压也由当地控制中心控制。然而，如果没有适当的无功支持，微电网负荷母线仍然可能处于低电压。但 PV 或风电的微电网可以设计为非同步运行。图 7-18 画出了一种这样的设计。

图 7-18 的微电网分布式发电系统设计为既可以作为同步系统运行，也可以作为非同步系统运行。这一分布式发电系统含一台变速双馈感应发电机的风电机组和一台同步燃气轮机。当微电网作为当地电网一部分运行时，它的频率控制及电压控制都由当地电网控制中心负责。当地电网运营商监视和控制系统频率，如第 4 章所

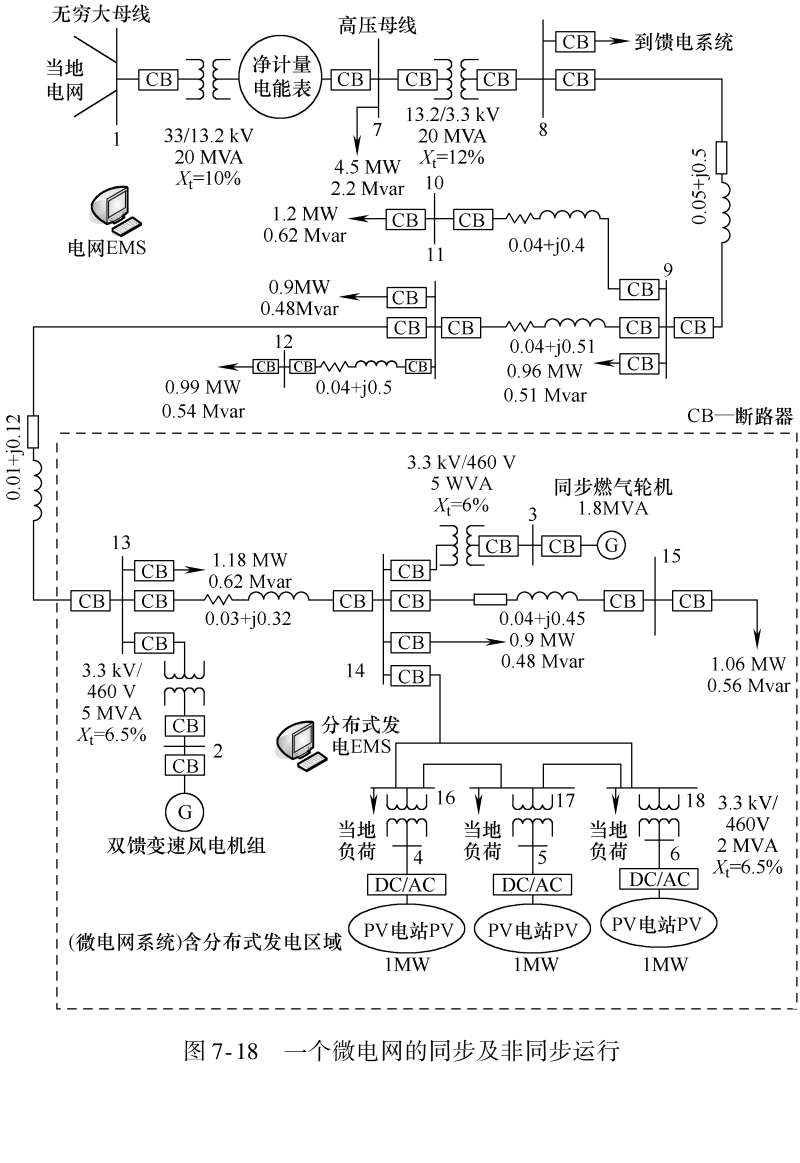


图 7-18　一个微电网的同步及非同步运行

讨论的。系统运营商也控制当地电网母线的电压。

燃气轮机可以作为 P-V 母线运行：母线电压和注入微电网的有功功率是固定的，无功功率和相位角在潮流分析中计算。双馈发电机模拟为只在恒压下注入有功功率的 P-V 母线。

当微电网的分布式发电部分从当地电网解列时，燃气轮机负责电压控制和负荷频率控制。这种情况下，在潮流分析中，燃气轮机应模拟为平衡母线。为保证运行稳定，该分布式发电系统的当地负荷控制非常重要。如果也提供负荷控制，这一独立微电网就称为智能微电网，因为它可以通过对负荷的控制保持稳定。

7.14　高级潮流解法：牛顿-拉夫逊法

为说明牛顿-拉夫逊法（Newton-Raphson algorithm），我们重申潮流问题的主方程为

$$V_1 = 1\angle 0° \tag{7-38}$$

母线导纳矩阵描述通过输电系统的净注入电流为

$$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}\boldsymbol{V}_{\text{Bus}} \tag{7-39}$$

母线注入功率为

$$S_k = V_k \cdot I_k^* \tag{7-40}$$

式中，S_k 是母线 k 的净注入复功率，V_k 是母线 k 的复数电压，I_k 是母线 k 的净注入电流。

把式（7-39）的母线净注入电流代入式（7-40）可获得每条母线 k 公式的残余形式为

$$S_k - V_k \sum_{j=1}^{n} Y_{kj}^* V_j^* = 0 \quad k = 1,\cdots,n \tag{7-41}$$

对于 $k=1$，有

$$S_1 - V_1 \sum_{j=1}^{n} Y_{1j}^* V_j^* = 0 \quad f_1(X) = 0 \tag{7-42}$$

对于 $k=2$　$$S_2 - V_2 \sum_{j=1}^{n} Y_{2j}^* V_j^* = 0 \quad f_2(X) = 0 \tag{7-43}$$

对于 $k=n$　$$S_n - V_n \sum_{j=1}^{n} Y_{nj}^* V_j^* = 0 \quad f_n(X) = 0 \tag{7-44}$$

以上各式可以以简洁形式表示为

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n(x) \end{bmatrix} = 0 \tag{7-45}$$

式中

$$[\boldsymbol{X}]^{\mathrm{T}}=[x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n]$$

上述公式中，变量矢量 $\boldsymbol{X}$ 代表母线电压矢量。

将 $F(x)=0$ 的第一行展开为关于解 $\boldsymbol{X}^{(0)}$ 的泰勒级数（Taylor series），有

$$f_1(\boldsymbol{X})=f_1(x_1,x_2,\cdots,x_n)=f_1(x_1^{(0)},x_2^{(0)},\cdots,x_n^{(0)})+\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{X^{(0)}}\Delta x_1 \\ +\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{X^{(0)}}\Delta x_2+\cdots+\left.\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right|_{X^{(0)}}+\text{更高阶项} \tag{7-46}$$

式（7-46）可以用紧凑形式表示为

$$f_1(\boldsymbol{X})=f_1(\boldsymbol{X}^{(0)})+\sum_{j=1}^{n}\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_{X^{(0)}}\Delta x_j=0 \tag{7-47}$$

$$f_2(\boldsymbol{X})=f_2(\boldsymbol{X}^{(0)})+\sum_{j=1}^{n}\left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_{X^{(0)}}\Delta x_j=0 \tag{7-48}$$

$$f_n(\boldsymbol{X})=f_n(\boldsymbol{X}^{(0)})+\sum_{j=1}^{n}\left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_{X^{(0)}}\Delta x_j=0 \tag{7-49}$$

式中，$\Delta x_j=x_j-x_j^{(0)}$。以紧凑矩阵表示，有

$$F(\boldsymbol{X})=F(\boldsymbol{X}^{(0)})+\left.\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\cdots\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\cdots\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\\ \vdots\\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\cdots\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\end{bmatrix}\right|_{\boldsymbol{X}^{(0)}}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ \vdots\\ \Delta x_n\end{bmatrix}=0 \tag{7-50}$$

式（7-50）的矩阵被称为雅可比矩阵（Jacobian matrix）。以上公式可改写为

$$F(\boldsymbol{X}^{(0)})+[\boldsymbol{J}]|_{\boldsymbol{X}^{(0)}}[\Delta\boldsymbol{X}]=0 \tag{7-51}$$

$$f_k(\boldsymbol{X}^0)=S_k-V_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^*V_j^*\text{，且}[\boldsymbol{X}^0]=[V_1^{(0)}\cdots V_i^{(0)},\cdots V_n^{(0)}] \tag{7-52}$$

式中，S_k 是母线 k 的预计净注入（发电机母线或负荷）复功率（发电为正）。因此，$F(\boldsymbol{X}^{(0)})$ 项代表每条母线的功率偏差。当 $F(\boldsymbol{X}^{(0)})$ 项很小时，就得到了潮流解。

$$S_{k(\text{计算值})}=V_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^*V_j^* \tag{7-53}$$

式（7-53）代表从母线 k 到其他所有母线 j 的潮流计算值。

可以用式（7-51）对 $\Delta\boldsymbol{X}$ 求解：

$$[\Delta\boldsymbol{X}]=-[\boldsymbol{J}]_{\boldsymbol{X}^{(0)}}^{-1}\cdot F(X^{(0)}) \tag{7-54}$$

$$F_k(X^0)=\Delta S_k=\Delta P_k+\mathrm{j}\Delta Q_k=S_{k(\text{预计值})}-S_{k(\text{计算值})} \tag{7-55}$$

$$\Delta P_k=P_{k(\text{预计值})}-P_{k(\text{计算值})}$$

$$\Delta Q_k = Q_{k(\text{预计值})} - Q_{k(\text{计算值})} \tag{7-56}$$

7.14.1　牛顿-拉夫逊法

求解步骤如下：

1）写出残余形式的潮流方程：$F(\boldsymbol{X})=0$。

2）猜测矢量解 $\boldsymbol{X}^{(0)}$，并评估 $F(\boldsymbol{X}^{(0)})$。

3）对 $\boldsymbol{X}^{(0)}$ 计算雅克比矩阵 $\boldsymbol{J}$。

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{X}^{(0)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\cdots\cdots\cdots\cdots\frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\cdots\cdots\cdots\cdots\frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\cdots\cdots\cdots\cdots\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}\Bigg|_{\boldsymbol{X}^{(0)}(\text{或一般情况}\boldsymbol{X}^{(i)})} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}^{(0)})$$

$\Delta\boldsymbol{X}$ 是下述方程的计算值。

初始计算：使用 $\boldsymbol{X}$ 的初始猜测值。

第 1 步：$[\Delta\boldsymbol{X}] = -[\boldsymbol{J}]^{-1}_{\boldsymbol{X}^{(i)}} F(\boldsymbol{X}^{(i)})$。

第 2 步：更新 $\boldsymbol{X}^{(i+1)} = \boldsymbol{X}^{(i)} + \Delta\boldsymbol{X}$。

第 3 步：计算 $\boldsymbol{X}^{(i+1)}$ 处的 $F(\boldsymbol{X})$。

第 4 步：核对，如果 $F(\boldsymbol{X}^{(i+1)}) < 10^{-6}$，则解收敛。存储解矢量 $\boldsymbol{X}^{(i+1)}$。

第 5 步：将 i 更新为 $i+1$。

如果 $F(\boldsymbol{X}^{(i+1)}) \nless 10^{-6}$，则回到第 1 步。

例 7.6　考虑图 7-19 的三母线系统。系统数据如下：

1）母线 1 为平衡母线，$V_1 = 1\angle 0°$。

2）母线 2 的预计注入功率为 1.2pu。

3）母线 3 的预计负荷（负注入）为 1.5pu。

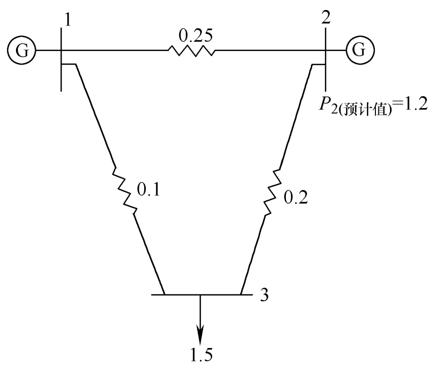


图 7-19　例 7.6 的单线图

例 7.6 系统的母线导纳矩阵为

$$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} 14 & -4 & -10 \\ -4 & 9 & -5 \\ -10 & -5 & 15 \end{bmatrix}$$

母线功率可表示为母线电压非线性函数的残余形式：

$$P_1(V_1,V_2,V_3) - V_1(Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3) = 0$$

$$P_2(V_1,V_2,V_3) - V_2(Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3) = 0$$

$$P_3(V_1,V_2,V_3) - V_3(Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3) = 0$$

使用猜测解 $V_2^{(0)}$、$V_3^{(0)}$ 的泰勒级数展开，且 $V_1^{(0)}=1\angle 0°$。

$$\begin{bmatrix}\Delta P_1\\ \Delta P_2\\ \Delta P_3\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\frac{\partial P_1}{\partial V_1}\frac{\partial P_1}{\partial V_2}\frac{\partial P_1}{\partial V_3}\\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1}\frac{\partial P_2}{\partial V_2}\frac{\partial P_2}{\partial V_3}\\ \frac{\partial P_3}{\partial V_1}\frac{\partial P_3}{\partial V_2}\frac{\partial P_3}{\partial V_3}\end{bmatrix}\Bigg|_{\boldsymbol{V}^{(0)}}\begin{bmatrix}\Delta V_1\\ \Delta V_2\\ \Delta V_3\end{bmatrix}$$

用紧凑方式表示为

$$[\Delta \boldsymbol{V}]=-[\boldsymbol{J}]^{-1}\times[\Delta \boldsymbol{P}]$$

式中

$$P_{2(\text{计算值})}=V_2^{(0)}(Y_{21}V_1^{(0)}+Y_{22}V_2^{(0)}+Y_{23}V_3^{(0)})$$

$$\Delta P_2=P_{2(\text{预计值})}-P_{2(\text{计算值})}=0$$

$$P_{3(\text{计算值})}=V_3^{(0)}(Y_{31}V_1^{(0)}+Y_{32}V_2^{(0)}+Y_{33}V_3^{(0)})$$

$$\Delta P_3=P_{3(\text{预计值})}-P_{3(\text{计算值})}=0$$

因为 $V_1=1\angle 0°$（松弛母线），所以 $\Delta V_1=0.0$。因此。只有母线 2 和母线 3 的电压需要计算。雅可比矩阵为如下的 2×2 矩阵：

$$\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta P_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial P_2}{\partial V_2}\frac{\partial P_2}{\partial V_3}\\ \frac{\partial P_3}{\partial V_2}\frac{\partial P_3}{\partial V_3}\end{bmatrix}\Bigg|_{\boldsymbol{V}^{(0)}}\begin{bmatrix}\Delta V_2\\ \Delta V_3\end{bmatrix}$$

由上述矩阵可计算 ΔV_2 和 ΔV_3：

$$\begin{bmatrix}\Delta V_2\\ \Delta V_3\end{bmatrix}=-[\boldsymbol{J}]_{\boldsymbol{V}^{(0)}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta P_3\end{bmatrix}$$

上述解可改写为

$$\Delta V_2=V_{2(\text{new})}-V_{2(\text{old})}$$

$$\Delta V_3=V_{3(\text{new})}-V_{3(\text{old})}$$

$$\begin{bmatrix}V_2\\ V_3\end{bmatrix}\Bigg|_{\text{new}}=\begin{bmatrix}V_2\\ V_3\end{bmatrix}\Bigg|_{\text{old}}+[\boldsymbol{J}]_{\boldsymbol{V}^{(0)}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta P_3\end{bmatrix}$$

雅可比矩阵的元素为

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2}=Y_{21}V_1+2Y_{22}V_2+Y_{23}V_3$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3}=Y_{23}V_2$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2}=Y_{32}V_3$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_3}=Y_{31}V_1+Y_{32}V_2+2Y_{33}V_3$$

假定 $V_2^{(0)}=1$，$V_3^{(0)}=1$，则雅可比矩阵的元素为

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2}=-4+2\times9-5=9$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3}=-5$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2}=-5$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_3}=-10-5+2\times15=15$$

因此，雅可比矩阵如下：

$$[\boldsymbol{J}]=\begin{bmatrix}9 & -5\\ -5 & 15\end{bmatrix}$$

而 $[\boldsymbol{J}]^{-1}$ 为

$$[\boldsymbol{J}]^{-1}=\frac{1}{110}\begin{bmatrix}15 & 5\\ 5 & 9\end{bmatrix}$$

各条母线的功率偏差为

$$P_{2(\text{计算值})}=V_2^{(0)}(Y_{21}V_1^{(0)}+Y_{22}V_2^{(0)}+Y_{23}V_3^{(0)})$$

$$P_{2(\text{计算值})}=1.0\times[(-4)\times1+9\times1-5\times1]=0$$

$$\Delta P_2=P_{2(\text{预计值})}-P_{2(\text{计算值})}$$

$$\Delta P_2=1.2-0=1.2$$

$$P_{3(\text{计算值})}=V_3^{(0)}(Y_{31}V_1^{(0)}+Y_{32}V_2^{(0)}+Y_{33}V_3^{(0)})$$

$$P_{3(\text{计算值})}=1.0\times[(-10)\times1-5\times1+15\times1]=0$$

$$\Delta P_3=P_{3(\text{预计值})}-P_{3(\text{计算值})}$$

$$\Delta P_3=-1.5-0=-1.5$$

$$\begin{bmatrix}V_2\\ V_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.0\\ 1.0\end{bmatrix}+\frac{1}{110}\begin{bmatrix}15 & 5\\ 5 & 9\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1.2\\ -1.5\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}V_2\\ V_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.095\\ 0.932\end{bmatrix}$$

下一次迭代将使用这些新值。只要误差没有到达满意水平，迭代就要继续进行。例 7.6 的计算结果见表 7-3。解上述问题的 MATLAB 仿真平台如下：

```
%Power Flow: Newton Raphson
clc; clear all;
mis_match=0.0001;
Y_bus=[ 1/.25+1/.1     -1/.25        -1/.1;
         -1/.25     1/.25+1/.2      -1/.2;
         -1/.1         -1/.2       1/.1+1/.2];
```

```
P_sch = [1; 1.2; -1.5];

N = 3; % no. of buses

% allocate storage for Jacobian
J = zeros(N-1,N-1);

% initial mispatch
V = [1 1 1]';

P_calc = V.*(Y_bus*V);
mismatch = [P_sch(2:N)-P_calc(2:N)];

iteration=0;
% Newton-Raphson iteration
while (iteration<10)
 iteration=iteration+1;
 % calculate Jacobian
 for i = 2:N
  for j = 2:N
   if (i == j)
    J(i-1,j-1)=Y_bus(i,:)*V+Y_bus(i,i)*V(i);
   else
    J(i-1,j-1)=Y_bus(i,j)*V(i);
   end
  end
 end
 % calculate correction
 correction =inv(J)*mismatch;
 V(2:N) = V(2:N)+correction(1:(N-1));

 % calculate mismatch and stop iterating
 % if the solution has converged
 P_calc = V.*(Y_bus*V);
 mismatch = [P_sch(2:N)-P_calc(2:N)];
  if (norm(mismatch,'inf') < mis_match)
   break;
  end
 end
 iteration
 % output solution data
 for i = 1:N
  fprintf(1, 'Bus %d:\n', i);
  fprintf(1, ' Voltage = %f p.u\n', abs(V(i)));
  fprintf(1, ' Injected P = %f p.u \n', P_calc(i));
 end
```

表 7-3　例 7.6 的结果

母线编号	电压（pu）	功率偏差（pu）
2	1.08	0.3036×10^{-6}
3	0.92	0.6994×10^{-6}

结果

对于 $c_p=1\times10^{-4}$，经过 3 次迭代得到结果。

母线 1（平衡母线）提供的功率等于总负荷减去所有其他母线的发电功率加损耗。

平衡母线的电压为 $1\angle0°$，它的功率标幺值为 $P_1=0.522$pu。

输电线的总功率损耗为 0.223pu。

7.14.2　牛顿-拉夫逊法的一般性表述

以上讨论介绍了牛顿-拉夫逊法的基本概念。下面介绍计算雅可比矩阵元素的牛顿-拉夫逊法的一般性表述[12]。仍然从基本方程式开始。

$$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}}=\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}$$

对于任意一条母线 k，$I_k=\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}V_j$，式中 n 是母线数量，Y_{kj}是 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$矩阵的元素。对任一母线 k，有

$$P_k+\text{j}Q_k=V_kI_k^*$$

式中，P_k 和 Q_k 都是实数，无功功率指进入节点 k 的无功（*表示复共轭，$\text{j}=\sqrt{-1}$）。

令

$$P_k+\text{j}Q_k=V_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^*V_j^* \tag{7-57}$$

$$V_k=V_k\cdot\text{e}^{\text{j}\theta_k}=e_k+\text{j}\cdot f_k;\theta_k=\arctan\frac{f_k}{e_k} \tag{7-58}$$

$$Y_{kj}=Y_{kj}\cdot\text{e}^{\text{j}\alpha_{kj}}=G_{kj}+\text{j}\cdot B_{kj};\alpha_{kj}=\arctan\frac{B_{kj}}{G_{kj}} \tag{7-59}$$

把式（7-58）和式（7-59）带入式（7-57），得

$$P_k+\text{j}Q_k=V_k\text{e}^{\text{j}\theta_k}\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}\text{e}^{-\text{j}\alpha_{kj}}V_j\text{e}^{-\text{j}\theta_j} \tag{7-60}$$

使用泰勒级数展开，潮流问题可表示为

$$\Delta P_k=\sum_{j=1}^{n}H_{kj}\Delta\theta_j+\sum_{j=1}^{n}N_{kj}\frac{\Delta V_j}{V_j} \tag{7-61}$$

$$\Delta Q_k=\sum_{j=1}^{n}J_{kj}\Delta\theta_j+\sum_{j=1}^{n}L_{kj}\frac{\Delta V_j}{V_j} \tag{7-62}$$

它的紧凑形式为

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial P}{\partial\theta} & \dfrac{\partial P}{\partial V}V\\ \dfrac{\partial Q}{\partial\theta} & \dfrac{\partial Q}{\partial V}V\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \dfrac{\Delta V}{V}\end{bmatrix}\tag{7-63}$$

式（7-60）给出了复数域中的潮流非线性基本方程。读者可以对式（7-60）求导，计算 $j=k$ 情况下雅可比矩阵的下列对角线元素：

$$\begin{aligned}H_{kk}&=\frac{\partial P_k}{\partial\theta_k}=-Q_k-V_k^2B_{kk}\\ J_{kk}&=\frac{\partial Q_k}{\partial\theta_k}=P_k-V_k^2G_{kk}\\ N_{kk}&=\frac{\partial P_k}{\partial V_k}V_k=P_k+V_k^2G_{kk}\\ L_{kk}&=\frac{\partial Q_k}{\partial V_k}V_k=Q_k-V_k^2B_{kk}\end{aligned}\tag{7-64}$$

到目前为止，已经计算了（一般性方程）雅可比矩阵的对角线元素。要计算雅可比矩阵的非对角线元素，首先计算以下各式

$$I_j=a_j+\mathrm{j}\cdot b_j=Y_{kj}\cdot V_j\tag{7-65}$$

$$\begin{aligned}Y_{kj}\cdot V_j&=(G_{kj}+\mathrm{j}\cdot B_{kj})\cdot(e_j+\mathrm{j}\cdot f_j)\\ Y_{kj}\cdot V_j&=(G_{kj}\cdot e_j-B_{kj}f_j)+\mathrm{j}(B_{kj}e_j+G_{kj}f_j)\\ Y_{kj}\cdot V_j&=a_j+\mathrm{j}b_j\end{aligned}\tag{7-66}$$

式中，$a_j=G_{kj}\cdot e_j-B_{kj}f_j,b_j=B_{kj}e_j+G_{kj}f_j$。

对于 $j\neq k$，雅可比矩阵的非对角线元素如下：

$$\begin{aligned}H_{kj}&=\frac{\partial P_k}{\partial\theta_j}=a_jf_k-b_je_k\\ J_{kj}&=\frac{\partial Q_k}{\partial\theta_j}=-a_je_k-b_jf_k\\ N_{kj}&=\frac{\partial P_k}{\partial V_j}V_j=a_je_k+b_jf_k\\ L_{kj}&=\frac{\partial Q_k}{\partial V_j}V_j=a_jf_k-b_je_k\end{aligned}\tag{7-67}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H & N\\ J & L\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \dfrac{\Delta V}{V}\end{bmatrix}\tag{7-68}$$

潮流程序软件包含以下步骤：

1）按母线类型创建内部母线编号系统，重新为系统母线编号。

2）平衡母线选择为母线 1，然后是所有 P-V 类型的母线。

3）使用稀疏编程法降低存储需求。

4）将雅可比矩阵分解为上下两个三角形矩阵。

5）按如下归纳的方法计算对角线元素和非对角线元素。

对于 $j=k$，雅可比矩阵的对角线元素为

$$\left.\begin{aligned}H_{kk}&=-Q_k-B_{kk}V_k^2\\L_{kk}&=Q_k-B_{kk}V_k^2\\N_{kk}&=P_k+G_{kk}V_k^2\\J_{kk}&=P_k-G_{kk}V_k^2\end{aligned}\right\}\text{对于 } j=k \tag{7-69}$$

对于 $j\neq k$，非对角线元素为

$$\left.\begin{aligned}H_{kj}&=L_{kj}=a_jf_k-b_je_k\\N_{kj}&=-J_{kj}=a_je_k+b_jf_k\end{aligned}\right\}j\neq k \tag{7-70}$$

6）对所有母线 k，计算 $P_{k(\text{计算值})}$ 和 $Q_{k(\text{计算值})}$。

$$P_{k(\text{计算值})}=\sum_{j=1}^{n}\left[e_k(e_jG_{kj}-f_jB_{kj})+f_k(e_jB_{kj}+f_jG_{kj})\right] \tag{7-71}$$

$$Q_{k(\text{计算值})}=\sum_{j=1}^{n}\left[f_k(e_kG_{kj}-f_jB_{kj})-e_k(e_jB_{kj}+f_jG_{kj})\right] \tag{7-72}$$

式中，$V_k=e_k+\mathrm{j}\cdot f_k$；$Y_{kj}^*=G_{kj}-\mathrm{j}\cdot B_{kj}$；$V_k^*=e_k-\mathrm{j}\cdot f_k$。

7）计算有功功率和无功功率的偏差：

$$\Delta P_k^{(i)}=P_{k,(\text{预计值})}^{(i)}-P_{k,(\text{计算值})}^{(i)}<c_P \tag{7-73}$$

$$\Delta Q_k^{(i)}=Q_{k,(\text{预计值})}^{(i)}-Q_{k,(\text{计算值})}^{(i)}<c_Q \tag{7-74}$$

最后计算求解时，每次迭代逼近都要对雅可比矩阵进行评估。

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{V}^{(i)},\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^{(i)}$$

$$\Delta\boldsymbol{V}^{(k)}=\boldsymbol{V}^{(k+1)}-\boldsymbol{V}^{(k)}$$

$$\Delta\boldsymbol{\theta}^{(k)}=\boldsymbol{\theta}^{(k+1)}-\boldsymbol{\theta}^{(k)}$$

根据 $P_{k,(\text{预计值})}$、$Q_{k,(\text{预计值})}$ 以及母线潮流计算值 $P_{k,(\text{计算值})}$ 和 $Q_{k,(\text{计算值})}$ 计算每条母线的功率偏差。计算有功功率和无功功率的依据是网络的电压分布和 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 模型，使用已算得母线电压的 $\boldsymbol{V}^{(i)}$ 和 $\boldsymbol{\theta}^{(i)}$。

对于 P-V 母线，设 $\Delta V_k=0$。注意，对于 P-V 母线，需要计算发出的无功功率，并核对是否超出了 Q 限值。如果超出了限值，就需要将母线类型从 P-V 改为 PQ，以保持发出的无功功率在规定限值内。

7.14.3　解耦牛顿-拉夫逊法

很多系统的数值研究清楚表明，电压幅值的变化对有功潮流影响很小。此外，电压相位变化对无功潮流的影响也很小。这些结论对电缆线路和短线路可能并不正确。然而，对于大功率潮流这些结论通常是正确的。使用上述假定可以大大降低大型电网负荷潮流分析需要的计算机内存量。

重复一下上述假定是

1）偏导数$\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{V}}$假定为零。

2）偏导数$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}}$假定为零。

利用上述假定可以把负荷潮流问题的 $\Delta\boldsymbol{P}$-$\Delta\boldsymbol{\theta}$ 方程和 $\Delta\boldsymbol{Q}$-$\Delta\boldsymbol{V}$ 方程解耦。

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & 0\\ 0 & \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}V\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \frac{\Delta\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\end{bmatrix} \tag{7-75}$$

因此，式（7-75）可以分解成两个独立方程。

$$[\Delta\boldsymbol{P}]=\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right][\Delta\boldsymbol{\theta}]$$

$$[\Delta\boldsymbol{Q}]=\left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V}\right]\left[\frac{\Delta\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\right] \tag{7-76}$$

因此，式（7-75）可改写为

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H} & 0\\ 0 & \boldsymbol{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \frac{\Delta\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\end{bmatrix} \tag{7-77}$$

式中，$[\boldsymbol{H}]=\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right]$，$[\boldsymbol{L}]=\left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V}\right]$。

式（7-77）代表解耦的牛顿-拉夫逊法。

7.15 潮流快速解耦法

潮流快速解耦（Fast Decoupled Load Flow，FDLF）算法是牛顿-拉夫逊法的改进版。FDLF 法[9]利用了有功功率与无功功率之间的弱耦合，使用两个不变矩阵来近似和解耦雅可比矩阵[8]。把矩阵 $\boldsymbol{H}$ 改写为

$$[\Delta\boldsymbol{P}]=[\boldsymbol{H}][\Delta\boldsymbol{\theta}]$$

$$[\boldsymbol{H}]=\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right]=[\boldsymbol{V}][\boldsymbol{B}'][\boldsymbol{V}]$$

$$[\Delta\boldsymbol{P}]=[\boldsymbol{V}][\boldsymbol{B}'][\boldsymbol{V}][\Delta\boldsymbol{\theta}]$$

把公式两边除以 $\boldsymbol{V}$，得

$$\left[\frac{\Delta\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{V}}\right]=[\boldsymbol{B}'][\boldsymbol{V}][\Delta\boldsymbol{\theta}]$$

为获得系数恒定的线性近似表达式，令上式中的［$\boldsymbol{V}$］为 1，则

$$\left[\frac{\Delta\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{V}}\right]=[\boldsymbol{B}']\cdot[\Delta\boldsymbol{\theta}] \tag{7-78}$$

同样，在解耦牛顿-拉夫逊法中，矩阵 $\boldsymbol{L}$ 可写为

$$[\Delta \boldsymbol{Q}] = [\boldsymbol{L}]\left[\frac{\Delta \boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\right]$$

$$[\boldsymbol{L}] = \left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V}\right] = [\boldsymbol{V}][\boldsymbol{B}''][\boldsymbol{V}]$$

把上式两边都除以 $\boldsymbol{V}$，并令第二个 $\boldsymbol{V}$ 为 1，则

$$\left[\frac{\Delta \boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{V}}\right] = [\boldsymbol{B}''] \cdot [\Delta \boldsymbol{V}] \tag{7-79}$$

式（7-78）和式（7-79）代表了 FDLF 算法[13]。矩阵 $\boldsymbol{B}''$是矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 的虚部，$\boldsymbol{B}'$与 $\boldsymbol{B}''$相同，但忽略了线路电阻和并联元素。FDLF 法降低了内存需求，而且对多数问题都能收敛于可接受的解。但它的迭代次数增加了。当电网含短电缆或移相变压器时，FDLF 可能不收敛。然而，应该注意到，即使在 FDLF 是用雅克比矩阵的近似表达式建立的时候，潮流问题的收敛仍然要根据有功和无功潮流的初始偏离来校核。因此，如果 FDLF 收敛，则它的解与完整牛顿-拉夫逊法一样精确。

7.16　潮流问题分析

考虑解耦牛顿-拉夫逊法的情况，分析图 7-20 的注入模型。

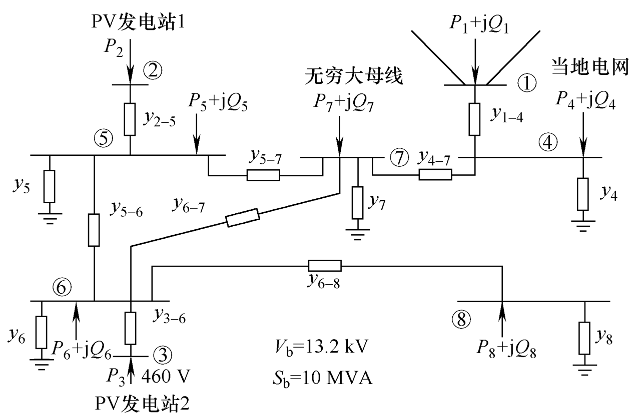


图 7-20　一个微电网的单线注入模型

使用表 7-4 和表 7-5 的数据显示未知变量与已知变量之间的线性关系。母线 1、2 和 3 的电压规定为固定值；因此，这些母线的电压变化为零，它们不列为表 7-5 中的未知变量。

表 7-4 注入有功功率为母线相位角的函数

已知量	未知量
P_2	θ_2
P_3	θ_3
P_4	θ_4
P_5	θ_5
P_6	θ_6
P_7	θ_7
P_8	θ_8

表 7-5 注入无功功率为母线电压的函数

已知量	未知量
Q_4	V_4
Q_5	V_5
Q_6	V_6
Q_7	V_7
Q_8	V_8

对于母线 1 的相位角，也有同样关系。

$$\begin{aligned}
\Delta P_2 &= \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2}\Delta\theta_2 + \frac{\partial P_2}{\partial \theta_5}\Delta\theta_5 \\
\Delta P_3 &= \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3}\Delta\theta_3 + \frac{\partial P_3}{\partial \theta_6}\Delta\theta_6 \\
\Delta P_4 &= \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4}\Delta\theta_4 + \frac{\partial P_4}{\partial \theta_7}\Delta\theta_7 \\
\Delta P_5 &= \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2}\Delta\theta_2 + \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5}\Delta\theta_5 + \frac{\partial P_5}{\partial \theta_6}\Delta\theta_6 + \frac{\partial P_5}{\partial \theta_7}\Delta\theta_7 \\
\Delta P_6 &= \frac{\partial P_6}{\partial \theta_3}\Delta\theta_3 + \frac{\partial P_6}{\partial \theta_5}\Delta\theta_5 + \frac{\partial P_6}{\partial \theta_6}\Delta\theta_6 + \frac{\partial P_6}{\partial \theta_7}\Delta\theta_7 + \frac{\partial P_6}{\partial \theta_8}\Delta\theta_8 \\
\Delta P_7 &= \frac{\partial P_7}{\partial \theta_4}\Delta\theta_4 + \frac{\partial P_7}{\partial \theta_5}\Delta\theta_5 + \frac{\partial P_7}{\partial \theta_6}\Delta\theta_6 + \frac{\partial P_7}{\partial \theta_7}\Delta\theta_7 \\
\Delta P_8 &= \frac{\partial P_8}{\partial \theta_6}\Delta\theta_6 + \frac{\partial P_8}{\partial \theta_8}\Delta\theta_8
\end{aligned} \tag{7-80}$$

如果仔细评估式（7-80）给出的方程组，可以看出，每条母线的注入功率都只是被考虑母线和网络中与它相连母线的函数。例如，母线 4 与母线 1 和母线 7 相连。母线 4 的注入功率会改变母线 1 与母线 7 之间的潮流。然而，母线 1 的相位变

化为零，因为母线 1 是平衡母线。我们知道，平衡母线的注入是在各母线电压都已算完且潮流问题收敛后才会计算。而且对于网络中连接母线的所有线路，情况也是如此。例如，母线 7 与母线 4、母线 5 和母线 6 连接，相应各项在母线 7 的注入模型中给出。如前所述，每个有功功率的偏差都是根据注入功率算得的，而有功功率则根据系统的 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 和母线电压算得。

$$\begin{matrix} & & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_6 \\ \Delta P_7 \\ \Delta P_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & 0 & 0 & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & 0 & 0 & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & 0 & 0 & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_7} & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2} & 0 & 0 & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_7} & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_3} & 0 & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_8} \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_8}{\partial \theta_6} & 0 & \frac{\partial P_8}{\partial \theta_8} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta\theta_6 \\ \Delta\theta_7 \\ \Delta\theta_8 \end{bmatrix} \tag{7-81}$$

式（7-81）是式（7-80）的矩阵形式。如前所述，雅可比矩阵的元素是通过对一般潮流公式进行偏微分算得的。每次迭代都使用上一次迭代算得的电压来计算式（7-82）中的矩阵 $\boldsymbol{H}$。

$$\begin{matrix} & & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_6 \\ \Delta P_7 \\ \Delta P_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & 0 & 0 & H_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{33} & 0 & 0 & H_{36} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{44} & 0 & 0 & H_{47} & 0 \\ H_{52} & 0 & 0 & H_{55} & H_{56} & H_{57} & 0 \\ 0 & H_{63} & 0 & H_{65} & H_{66} & H_{67} & H_{68} \\ 0 & 0 & H_{74} & H_{75} & H_{76} & H_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{86} & 0 & H_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta\theta_6 \\ \Delta\theta_7 \\ \Delta\theta_8 \end{bmatrix} \tag{7-82}$$

$$[\Delta \boldsymbol{P}] = [\boldsymbol{H}][\Delta \boldsymbol{\theta}] \tag{7-83}$$

线性化的 $\Delta \boldsymbol{Q} - \Delta \boldsymbol{V}$ 方程是使用表 7-5 和图 7-20 写出的。而且母线电压是来自其他母线的无功功率的函数。例如，母线 4 电压是母线 4 和母线 7 的无功功率的函数，只是因为母线电压是固定的。

$$\begin{bmatrix}\Delta Q_4\\ \Delta Q_5\\ \Delta Q_6\\ \Delta Q_7\\ \Delta Q_8\end{bmatrix}=\begin{array}{c} \begin{matrix} Q_4 & Q_5 & Q_6 & Q_7 & Q_8 \end{matrix}\\ \begin{bmatrix}\frac{\partial Q_4}{\partial V_4}V_4 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_4}{\partial V_7}V_7 & 0\\ 0 & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5}V_5 & \frac{\partial Q_5}{\partial V_6}V_6 & \frac{\partial Q_5}{\partial V_7}V_7 & 0\\ 0 & \frac{\partial Q_6}{\partial V_5}V_5 & \frac{\partial Q_6}{\partial V_6}V_6 & \frac{\partial Q_6}{\partial V_7}V_7 & \frac{\partial Q_6}{\partial V_8}V_8\\ \frac{\partial Q_7}{\partial V_4}V_4 & \frac{\partial Q_7}{\partial V_5}V_5 & \frac{\partial Q_7}{\partial V_6}V_6 & \frac{\partial Q_7}{\partial V_7}V_7 & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_8}{\partial V_6}V_6 & 0 & \frac{\partial Q_8}{\partial V_8}V_8\end{bmatrix}\end{array}\cdot\begin{bmatrix}\frac{\Delta V_4}{V_4}\\ \frac{\Delta V_5}{V_5}\\ \frac{\Delta V_6}{V_6}\\ \frac{\Delta V_7}{V_7}\\ \frac{\Delta V_8}{V_8}\end{bmatrix} \tag{7-84}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta Q_4\\ \Delta Q_5\\ \Delta Q_6\\ \Delta Q_7\\ \Delta Q_8\end{bmatrix}=\begin{array}{c} \begin{matrix} Q_4 & Q_5 & Q_6 & Q_7 & Q_8 \end{matrix}\\ \begin{bmatrix}L_{44} & 0 & 0 & L_{47} & 0\\ 0 & L_{55} & L_{56} & L_{57} & 0\\ 0 & L_{65} & L_{66} & L_{67} & L_{68}\\ L_{74} & L_{75} & L_{76} & L_{77} & 0\\ 0 & 0 & L_{86} & 0 & L_{88}\end{bmatrix}\end{array}\cdot\begin{bmatrix}\frac{\Delta V_4}{V_4}\\ \frac{\Delta V_5}{V_5}\\ \frac{\Delta V_6}{V_6}\\ \frac{\Delta V_7}{V_7}\\ \frac{\Delta V_8}{V_8}\end{bmatrix} \tag{7-85}$$

$$[\Delta \boldsymbol{Q}]=[\boldsymbol{L}]\left[\frac{\Delta \boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\right]$$

例 7.7 考虑图 7-21 给出的微电网。输电线 π 形等效模型如图 7-22 所示。

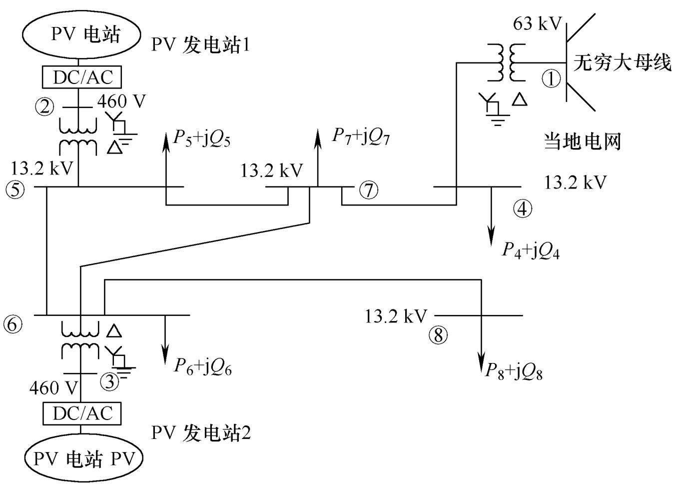


图 7-21 例 7.7 的光伏微电网

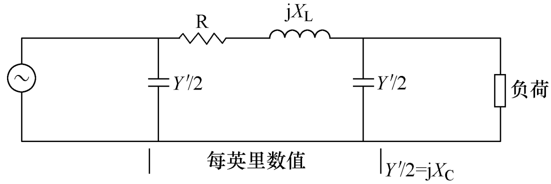


图 7-22　输电线 π 形等效模型

假定相关数据如下：

1）与 PV 发电站联结的变压器的额定电压和连接方式为：低压侧 460V，Y联结，中性点接地；高压侧 13.2kV，△联结，短路电抗 10%，容量 10MVA。与电网连接的变压器为 13.2/63kV，10MVA，短路电抗 10%。

2）母线 4 负荷假定为 1.5MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 5 负荷假定为 2.5MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 6 负荷假定为 1.0MW，功率因数为 0.95 滞后；母线 7 负荷假定为 2MW，功率因数为 0.95 超前；母线 8 负荷假定为 1.0MW，功率因数为 0.9 滞后。

3）输电线电阻 0.0685Ω/mile（0.0426Ω/km），电抗 0.40Ω/mile（0.249Ω/km），线路一半的充电导纳（$Y'/2$）为 $11\times10^{-6}\Omega^{-1}$/mile（$6.84\times10^{-6}\Omega^{-1}$/km）。线路 4—7 长度为 5mile（8.05km）；线路 5—6 长度为 3mile（4.83km）；线路 5—7 长度为 2mile（3.22km）；线路 6—7 长度为 2mile（3.22km）；线路 6—8 长度为 4mile（6.44km）。

4）PV 发电站 1 的额定容量为 0.75MW，PV 发电站 2 的额定容量为 3MW。假定两站均运行于功率因数 1。

进行以下计算：

1）假定 PV 发电站 1 的功率基值为 10MVA，电压基值为 460V，计算它的标幺值模型。

2）计算母线 Y 模型。

3）分别用牛顿-拉夫逊法和高斯-赛德尔法计算负荷母线电压。

4）计算微电网的母线电压和潮流。

5）向当地电网输入或输出的绿色电力是多少？

解

令功率基值为 $S_b=10$MVA；令 PV 电站侧的电压基值为 460V，输电线路侧的电压基值为 $V_b=13.2$kV。

阻抗基值为

$$Z_b=\frac{V_b^2}{S_b}=\frac{(13.2\times10^3)^2}{10\times10^6}\Omega=17.424\Omega$$

导纳基值为

$$Y_b = \frac{1}{Z_b} = \frac{1}{17.424} = 0.057$$

PV 系统的电流注入模型如图 7-23 所示。

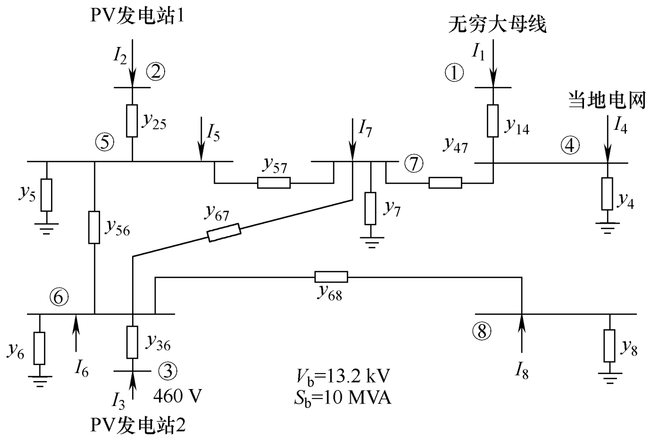


图 7-23　例 7.7 的电流注入模型

根据输电线路数据，原始阻抗和导纳计算如下：

$$
\begin{aligned}
&Z_{1-4\text{pu}} = Z_{2-5\text{pu}} = Z_{3-6\text{pu}} = \text{j}0.1,\\
&y_{14,\text{pu}} = y_{25,\text{pu}} = y_{36,\text{pu}} = \frac{1}{\text{j}0.1} = -\text{j}10\\
&Z_{4-7} = 5(0.0685 + \text{j}0.4)/Z_b = 0.020 + \text{j}0.115,\\
&y_{47,\text{pu}} = \frac{1}{0.020 + \text{j}0.115} = 1.45 - \text{j}8.46\text{pu}\\
&Z_{5-6} = 3(0.0685 + \text{j}0.4)/Z_b = 0.012 + \text{j}0.069,\\
&y_{56,\text{pu}} = \frac{1}{0.012 + \text{j}0.069} = 2.42 - \text{j}14.11\text{pu}\\
&Z_{5-7} = Z_{6-7} = 2(0.0685 + \text{j}0.4)/Z_b = 0.008 + \text{j}0.046\text{pu}\\
&y_{57,\text{pu}} = y_{67,\text{pu}} = \frac{1}{0.008 + \text{j}0.046} = 3.62 - \text{j}21.16\\
&Z_{6-8} = 4(0.0685 + \text{j}0.4)/Z_b = 0.016 + \text{j}0.092\text{pu}\\
&y_{68,\text{pu}} = \frac{1}{0.016 + \text{j}0.092} = 1.18 - \text{j}10.57
\end{aligned}
\tag{7-86}
$$

线路充电导纳等于图 7-22 中的 $Y'/2$。它们的标幺值为

$$y'_{47,\text{pu}} = 5 \times \frac{\text{j}11 \times 10^{-6}}{Y_b} = \text{j}9.58 \times 10^{-4}, y'_{56,\text{pu}} = 3 \times \frac{\text{j}11 \times 10^{-6}}{Y_b} = \text{j}5.75 \times 10^{-4},$$

$$y'_{57,\text{pu}} = y'_{67,\text{pu}} = 2 \times \frac{\text{j}11 \times 10^{-6}}{Y_b} = \text{j}3.83 \times 10^{-4}, y'_{68,\text{pu}} = 4 \times \frac{\text{j}11 \times 10^{-6}}{Y_b} = \text{j}7.67 \times 10^{-4}$$

用式（7-18）计算导纳标幺值矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$，

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}=\begin{bmatrix} -\mathrm{j}10 & 0 & 0 & \mathrm{j}10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mathrm{j}10 & 0 & 0 & \mathrm{j}10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathrm{j}10 & 0 & 0 & \mathrm{j}10 & 0 & 0 \\ \mathrm{j}10 & 0 & 0 & 1.45-\mathrm{j}18.46 & 0 & 0 & -1.45+\mathrm{j}8.46 & 0 \\ 0 & \mathrm{j}10 & 0 & 0 & 6.04-\mathrm{j}45.26 & -2.42+\mathrm{j}14.11 & -3.62+\mathrm{j}21.16 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{j}10 & 0 & -2.42+\mathrm{j}14.11 & 7.85-\mathrm{j}55.84 & -3.62+\mathrm{j}21.16 & -1.81+\mathrm{j}10.58 \\ 0 & 0 & 0 & -1.45+\mathrm{j}8.46 & -3.62+\mathrm{j}21.16 & -3.62+\mathrm{j}21.16 & 8.69-\mathrm{j}50.78 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.81+\mathrm{j}10.58 & 0 & 1.81-\mathrm{j}10.58 \end{bmatrix}$$

编写一个 MATLAB 程序进行潮流分析。PV 发电站母线被视为解负荷潮流问题的 PV 母线。PV 发电站母线电压固定为 1pu。表 7-6 给出了每条母线的预计功率。

表 7-6　每条母线的预计有功功率和无功功率

母线编号	2	3	4	5	6	7	8
$P_{预计值}$	0.075	0.3	−0.150	−0.250	−0.100	−0.200	−0.100
$Q_{预计值}$	—	—	−0.073	−0.121	−0.033	0.066	−0.048

对本潮流问题，允许误差选为 1×10^{-5}。分别用牛顿-拉夫逊法和高斯-赛德尔法解本潮流问题。表 7-7 给出的是用牛顿-拉夫逊法计算的结果。它经过 3 次迭代收敛。而高斯-赛德尔法经过 392 次迭代才收敛（见表 7-8）。

为保持 PV 母线 2 和 PV 母线 3 电压为 1pu，母线 2 需要的无功功率为 0.094pu，母线 3 需要的无功功率为 0.085pu。来自当地电网的有功潮流为 0.065pu。

从表 7-7 和表 7-8 可以看出，为维持母线 2 和母线 3 的电压为 1pu，与这两条母线连接的 PV 电站需要的无功功率分别为 0.094pu 和 0.085pu。如果 PV 系统有就地储能系统，逆变器控制可以被设置为提供这些无功功率。也可以在 PV 电站的交流侧安装需要的无功支持设备来提供这些无功。母线 2 预计需要无功支持设备 0.094pu，而母线 3 需要 0.085pu。把预计支持无功注入 PV 电站母线的情况包括在内，再计算潮流问题。得到的结果见表 7-9。程序在 3 次迭代后收敛。

表 7-7（a）　用牛顿-拉夫逊法算得的每条母线的电压和功率

$S_b=10MVA$，$V_b=13.2kV$								
母线编号	电压（pu）	相位（°）	发电量		负荷		ΔP	ΔQ
			MW（pu）	Mvar（pu）	MW（pu）	Mvar（pu）		
1	1.000	0.0	0.427	0.065	0	0	0	0
2	1.000	−4.1	0.075	0.094	0	0	0.005×10^{-10}	0
3	1.000	−2.5	0.300	0.085	0	0	0.021×10^{-10}	0
4	0.994	−2.5	0	0	0.150	0.073	0.189×10^{-10}	0.424×10^{-10}
5	0.991	−4.6	0	0	0.250	0.121	0.127×10^{-10}	0.002×10^{-10}
6	0.992	−4.3	0	0	0.100	0.033	0.079×10^{-10}	0.071×10^{-10}
7	0.992	−4.3	0	0	0.200	−0.066	0.233×10^{-10}	0.110×10^{-10}
8	0.986	−4.8	0	0	0.100	0.048	0.074×10^{-10}	0.009×10^{-10}

表 7-7（b）　用牛顿-拉夫逊法算得的通过输电线路和变压器的潮流

P_{loss}（pu）=0.002，Q_{loss}（pu）=0.035			
送出母线	到达母线	有功功率（pu）	无功功率（pu）
1	4	0.427	0.065
2	5	0.075	0.094
3	6	0.300	0.085
4	7	0.277	−0.025
5	6	−0.079	−0.006
5	7	−0.097	−0.021
6	7	0.021	−0.012
6	8	0.100	0.049

表 7-8（a）　用高斯-赛德尔法算得的每条母线的电压和功率

$S_b=10MVA$，$V_b=13.2kV$								
母线编号	电压（pu）	相位（°）	发电量		负荷		ΔP	ΔQ
			MW（pu）	Mvar（pu）	MW（pu）	Mvar（pu）		
1	1.000	0.0	0.427	0.065	0	0	0	0
2	1.000	−4.1	0.075	0.094	0	0	0.179×10^{-5}	0
3	1.000	−2.5	0.300	0.085	0	0	0.181×10^{-5}	0
4	0.994	−2.5	0	0	0.150	0.073	0.141×10^{-5}	0.018×10^{-5}
5	0.991	−4.6	0	0	0.250	0.121	0.783×10^{-5}	0.100×10^{-5}
6	0.992	−4.3	0	0	0.100	0.033	0.979×10^{-5}	0.132×10^{-5}
7	0.992	−4.3	0	0	0.200	−0.066	0.822×10^{-5}	0.137×10^{-5}
8	0.986	−4.8	0	0	0.100	0.048	0.188×10^{-5}	0.031×10^{-5}

表 7-8（b）　用高斯-赛德尔法算得的通过输电线路和变压器的潮流

P_{loss}（pu）=0.002，Q_{loss}（pu）=0.035			
送出母线	到达母线	有功功率（pu）	无功功率（pu）
1	4	0.427	0.065
2	5	0.075	0.094
3	6	0.300	0.085
4	7	0.277	−0.025
5	6	−0.079	−0.006
5	7	−0.097	−0.021
6	7	0.021	−0.012
6	8	0.100	0.049

表 7-9（a）　PV 发电站母线含无功补偿时每条母线的电压和功率

S_b =10MVA，V_b =13.2kV								
母线编号	电压（pu）	相位（°）	发电量		负荷		ΔP	ΔQ
			MW（pu）	Mvar（pu）	MW（pu）	Mvar（pu）		
1	1.000	0.0	0.427	0.065	0	0	0	0
2	1.000	−4.1	0.075	0.094	0	0	0.049×10^{-8}	0.003×10^{-8}
3	1.000	−2.5	0.300	0.085	0	0	0.196×10^{-8}	0.081×10^{-8}
4	0.994	−2.5	0	0	0.150	0.073	0.064×10^{-8}	0.086×10^{-8}
5	0.991	−4.6	0	0	0.250	0.121	0.230×10^{-8}	0.016×10^{-8}
6	0.992	−4.3	0	0	0.100	0.033	0.131×10^{-8}	0.148×10^{-8}
7	0.992	−4.3	0	0	0.200	−0.066	0.131×10^{-8}	0.042×10^{-8}
8	0.986	−4.8	0	0	0.100	0.048	0.146×10^{-8}	0.007×10^{-8}

表 7-9（b）　PV 发电站母线含无功补偿时，通过输电线路和变压器的潮流

P_{loss}（pu）=0.002，Q_{loss}（pu）=0.035			
送出母线	到达母线	有功功率（pu）	无功功率（pu）
1	4	0.427	0.065
2	5	0.075	0.094
3	6	0.300	0.085
4	7	0.277	−0.025
5	6	−0.079	−0.006
5	7	−0.097	−0.021
6	7	0.021	−0.012
6	8	0.100	0.049

无功功率注入 PV 发电站母线，使这些母线的电压维持为 1pu。从表 7-9 可以看出，母线 1 提供的有功功率为 +0.427pu。这意味着，功率是从当地电网输入（购进）的。

功率基值为 10MVA（$S_b = 10\text{MVA}$）；因此，从当地电网输入的功率为 $P_1 = 0.427 \times S_b = 4.27\text{MW}$。与母线 2 连接的 PV 发电站 1 发出的功率为 $P_2 = 0.075 \times S_b = 0.75\text{MW}$。与母线 3 连接的 PV 发电站 2 发出的功率为 $P_3 = 0.300 \times S_b = 3.00\text{MW}$。

例 7.8　对例 7.7 的微电网电路，进行以下计算：

1）计算 FDLF 的矩阵 $\boldsymbol{B}''$和矩阵 $\boldsymbol{B}'$。

2）用 FDLF 法计算负荷母线电压和偏差。

解

1）由例 7.7，母线 1 是平衡母线，母线 2 和母线 3 是 PV 母线。因此，8 条母线中有 5 条 PQ 母线。矩阵 $\boldsymbol{B}''$是 5×5 阶的，等于矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$最后 5 行和 5 列的虚部：

$$\boldsymbol{B}'' = \begin{bmatrix} -18.46 & 0 & 0 & 8.46 & 0 \\ 0 & -45.26 & 14.11 & 21.16 & 0 \\ 0 & 14.11 & -55.84 & 21.16 & 10.58 \\ 8.46 & 21.16 & 21.16 & -50.78 & 0 \\ 0 & 0 & 10.58 & 0 & -10.18 \end{bmatrix}$$

计算 $\boldsymbol{B}'$时忽略电阻和并联元件。$\boldsymbol{B}'$是一个 7×7 矩阵。它的对角线元素为

$$B'_{22} = -\text{j}10, B'_{33} = -\text{j}10, B'_{44} = -\text{j}10 - \text{j}8.71 = -\text{j}18.71,$$
$$B'_{55} = -\text{j}10 - \text{j}14.52 - \text{j}21.78 = -\text{j}46.30, B'_{66} = -\text{j}10 - \text{j}14.52 - \text{j}21.78 - \text{j}10.89 = -\text{j}57.19,$$
$$B'_{77} = -\text{j}8.71 - \text{j}21.78 - \text{j}21.78 = -\text{j}52.27, B'_{88} = -\text{j}10.89$$

它的非对角线元素为

$$B'_{kj} = \frac{1}{x_{kj,\text{pu}}}$$

式中，$x_{kj,\text{pu}}$是母线 k 与 j 之间串联电抗的标幺值。

矩阵是对称的。它的上部三角形元素为

$$B'_{25} = B'_{36} = \frac{1}{x_{25,\text{pu}}} = \frac{1}{x_{36,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.1} = \text{j}10, B'_{57} = \frac{1}{x_{57,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.0459} = \text{j}21.78,$$
$$B'_{47} = \frac{1}{x_{47,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.1148} = \text{j}8.71, B'_{56} = \frac{1}{x_{56,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.0689} = \text{j}14.52,$$
$$B'_{68} = \frac{1}{x_{68,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.0918} = \text{j}10.89, B'_{67} = \frac{1}{x_{67,\text{pu}}} = -\frac{1}{\text{j}0.0459} = \text{j}21.78$$

矩阵元素为上述值的虚部。

$$
\boldsymbol{B}' = \begin{array}{c} \\ \left[\begin{array}{ccccccc} -10 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -18.71 & 0 & 0 & 8.71 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & -46.30 & 14.52 & 21.78 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 14.52 & -57.19 & 21.78 & 10.89 \\ 0 & 0 & 8.71 & 21.78 & 21.78 & -52.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10.89 & 0 & -10.89 \end{array}\right] \end{array}
\begin{array}{c} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{array}
$$

（列编号：2　3　4　5　6　7　8）

2）用 FDLF 法解题，允许误差为 1×10^{-5}。经过 6 次迭代解收敛。结果见表 7-10。

表 7-10（a）　**用快速解耦法算得的每条母线的电压和功率**

$S_b=10\text{MVA}$，$V_b=13.2\text{kV}$								
母线编号	电压（pu）	相位（°）	发电量		负荷		ΔP	ΔQ
			MW（pu）	Mvar（pu）	MW（pu）	Mvar（pu）		
1	1.000	0.0	0.427	0.065	0	0	0	0
2	1.000	−4.1	0.075	0.094	0	0	0.002×10^{-5}	0
3	1.000	−2.5	0.300	0.085	0	0	0.002×10^{-5}	0
4	0.994	−2.5	0	0	0.150	0.073	0.052×10^{-5}	0.086×10^{-5}
5	0.991	−4.6	0	0	0.250	0.121	0.063×10^{-5}	0.129×10^{-5}
6	0.992	−4.3	0	0	0.100	0.033	0.388×10^{-5}	0.295×10^{-5}
7	0.992	−4.3	0	0	0.200	−0.066	0.301×10^{-5}	0.504×10^{-5}
8	0.986	−4.8	0	0	0.100	0.048	0.190×10^{-5}	0.062×10^{-5}

表 7-10（b）　**用快速解耦法算得的通过输电线路和变压器的潮流**

P_{loss}（pu）=0.002，Q_{loss}（pu）=0.035			
送出母线	到达母线	有功功率（pu）	无功功率（pu）
1	4	0.427	0.065
2	5	0.075	0.094
3	6	0.300	0.085
4	7	0.277	−0.025
5	6	−0.079	−0.006
5	7	−0.097	−0.021
6	7	0.021	−0.012
6	8	0.100	0.049

本章用母线阻抗矩阵和母线导纳矩阵表述电网潮流。在大型互联电网的系统规划期，必须使用母线预测负荷解潮流问题，以保证规划的发电及输电系统处于可接受的母线负荷电压范围内，使系统线路和变压器等设备不致过载。在日常运行期间，对于 PV 发电及风力发电的微电网作为孤立系统运行的情况，也必须使用母线预测负荷解潮流问题，以保证微电网能在可接受的母线负荷电压下支持其负荷，使电缆、线路及变压器等设备不致过载。

习　　题

7.1　一台 440V，20kVA 的发电机通过阻抗为 1 + j0.012Ω 的电缆接到一个 440V，15kVA，功率因数为 0.9 滞后的电动机负荷。假定负荷电压设置为高于其额定值 5%。进行以下计算：

1）如负荷为Y联结，画出其三相电路。

2）如负荷为△联结，画出其三相电路。

3）画出其单线图。

4）计算发电机电压。

7.2　一台 440V，20kVA 的发电机通过阻抗为 1 + j0.012Ω 的电缆接到一个 440V，10kVA，功率因数为 0.9 滞后的△联结电动机负荷。假定负荷电压控制为额定电压，相位为基准相位。进行以下计算：

1）未知变量数是多少？

2）解母线电压需要多少个方程？给出表达式。

3）计算负荷母线电压。

7.3　图 7-24 的辐射状馈线连接到额定配电电压为 11.3kV 的当地电网。假定功率基值为 10kVA，电压基值为 11.3kV。进行以下计算：

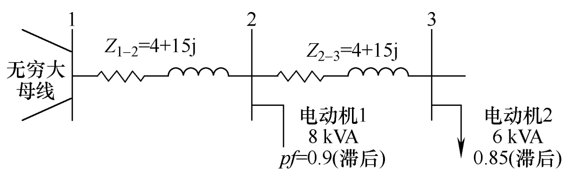


图 7-24　习题 7.3 的辐射状馈线

1）计算标幺值模型。

2）说出解母线负荷电压需要多少个方程？

3）使用高斯-赛德尔法计算母线电压。

4）计算母线 1 的功率。假定功率偏差为 0.00001pu。

5）计算总的有功功率损失和无功功率损失。

7.4　图 7-24 的辐射状馈线连接到额定配电电压为 11.3kV 的当地电网。假定功率基值为 15kVA，电压基值为 11.3kV。进行以下计算：

1）计算标幺值模型。

2）说出解母线负荷电压需要多少个方程？

3）计算 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$矩阵。

4）计算 $\boldsymbol{B}'$ 和 $\boldsymbol{B}''$矩阵。

5）计算母线电压。假定功率偏差为 0.00001pu。

6）计算母线 1 的功率。

7）计算总的有功功率损失和无功功率损失。

7.5　对于图 7-25 的电网，进行以下计算：

1）计算潮流分析研究用的母线导纳和母线阻抗模型。

2）在母线 1 和母线 2 之间加一条阻抗相同的平行线路，计算母线阻抗模型。

3）增加平行线路前和增加后，母线 1 的驱动点阻抗[㊀]都是多少？

4）去掉对地并联元件，再计算母线导纳和母线阻抗模型。

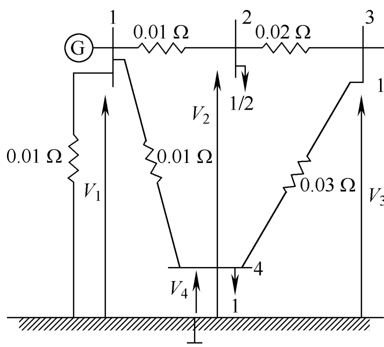


图 7-25　习题 7.5 的电网

7.6　考虑图 7-26 画出的电网。

假定相关数据如下：

1）连到 PV 发电站的变压器额定电压及连接方式为：低压侧 460V，Y联结，中性点接地；高压侧 13.2kV，△联结；短路电抗 10%，容量 8MVA。与电网连接的变压器为 13.2kV/63kV，8MVA，短路电抗 10%。

2）假定母线 5 负荷为 1.5MW，功率因数为 0.85 滞后；母线 6 负荷为 1.2MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 7 负荷为 2.4MW，功率因数为 0.9 超前；母线 4 负荷为 1.5MW，功率因数为 0.85 滞后；母线 8 负荷为 1.3MW，功率因数为 0.95 滞后。

3）假定 PV 发电站 1 的额定容量为 0.95MW；PV 发电站 2 额定容量为 3.5MW。

4）输电线电阻为 0.0685Ω/mile(0.0426Ω/km)，电抗为 0.40Ω/mile(0.249Ω/km)，线路一半的充电导纳（$Y'/2$）为 $11\times10^{-6}\Omega^{-1}$/mile($6.84\times10^{-6}\Omega^{-1}$/km)。线路 4—7 长度为 4mile(6.44km)；线路 4—8 长度为 2mile(3.22km)；线路 5—6 长度为 4mile(6.44km)；线路 5—7 长度为 1mile(1.609km)；线路 6—8 长度为 5mile(8.045km)。

进行以下计算：

1）求标幺值矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$。

㊀ 译者注：驱动点阻抗（driving point impedance）即输入阻抗（input impedance）。

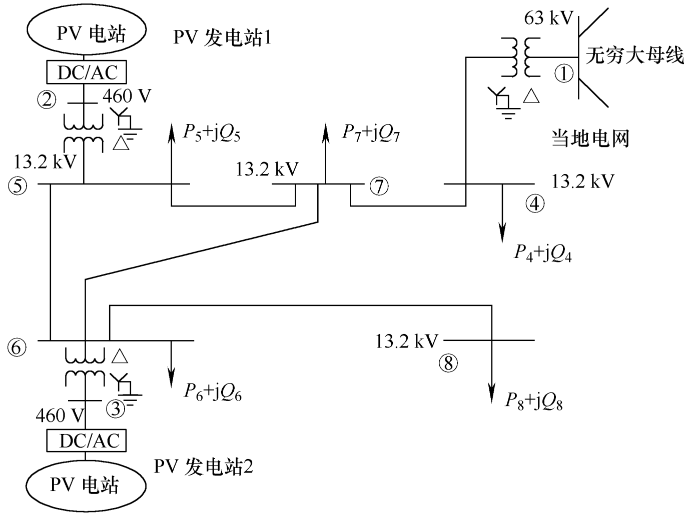


图 7-26 习题 7.6 的系统

2）写出 MATLAB 程序，用 FDLF 法计算负荷母线电压。

3）如果线路 6—7 停运，计算通过每台变压器的潮流。

4）如果在母线 5 加装 500kvar 无功，计算母线负荷电压。

7.7 考虑一个系统模拟为 $\boldsymbol{I}_{\text{Bus}} = \boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}\boldsymbol{V}_{\text{Bus}}$ 的电网。对于每条母线 k，有 $I_k = \sum_{m=1}^{n} Y_{km}V_m$，式中 n 是母线数，Y_{km} 是矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 的元素。对每条母线 k，还可以写出

$$P_k + \mathrm{j}Q_k = V_k I_k^*$$

式中，P_k 和 Q_k 是进入节点 k 的有功功率和无功功率（* 表示复共轭，$\mathrm{j} = \sqrt{-1}$）。

令

$$P_k + \mathrm{j}Q_k = V_k \sum_{m=1}^{n} Y_{km}^* V_m^*$$

$$V_k = V_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta k} = e_k + \mathrm{j}f_k ; \theta_k = \arctan \frac{f_k}{e_k}$$

$$Y_{km} = Y_{km}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha_{km}} = G_{km} + \mathrm{j}B_{km} ; \alpha_{km} = \arctan \frac{B_{km}}{G_{km}}$$

把上述关系带入 $P_k + \mathrm{j}Q_k = V_k \sum_{m=1}^{n} Y_{km}^* V_m$，得

$$P_k + \mathrm{j}Q_k = V_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_k} \sum_{m=1}^{n} Y_{km}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\alpha_{km}} V_m \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_m}$$

然后使用泰勒级数展开，则潮流问题表示为

$$\Delta P_k = \sum_{m=1}^{n} H_{km}\Delta\theta_m + \sum_{m=1}^{n} N_{km}\frac{\Delta V_m}{V_m}$$

$$\Delta Q_k = \sum_{m=1}^{n} J_{km}\Delta\theta_m + \sum_{m=1}^{n} L_{km}\frac{\Delta V_m}{V_m}$$

它的紧凑形式为

$$\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{P}\\ \Delta \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H} & \boldsymbol{N}\\ \boldsymbol{J} & \boldsymbol{L}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{\theta}\\ \dfrac{\Delta \boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{P}\\ \Delta \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V}\\ \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{\theta}\\ \dfrac{\Delta \boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V}}\end{bmatrix}$$

试证明，对于 $m=k$，有

$$H_{kk}=\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k}=-Q_k-V_k^2B_{kk}$$

$$J_{kk}=\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k}=P_k-V_k^2G_{kk}$$

7.8　对于习题 7.7 的系统，试证明，对于 $m=k$，存在下述关系：

$$N_{kk}=\frac{\partial P_k}{\partial V_k}V_k=P_k+V_k^2G_{kk}$$

$$L_{kk}=\frac{\partial Q_k}{\partial V_k}V_k=Q_k-V_k^2B_{kk}$$

7.9　考虑习题 7.7。首先令

$$I_m=a_m+\mathrm{j}b_m=Y_{km}V_m$$

$$\text{且 } Y_{km}V_m=(G_{km}+\mathrm{j}B_{km})(e_m+\mathrm{j}f_m)$$

$$Y_{km}V_m=(G_{km}e_m-B_{km}f_m)+\mathrm{j}(B_{km}e_m+G_{km}f_m)$$

然后利用下述关系式：

$$a_m=G_{km}\cdot e_m-B_{km}f_m$$

$$b_m=B_{km}\cdot e_m+G_{km}f_m$$

导出如下表达式：

$$H_{km}=\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m}=a_mf_k-b_me_k$$

$$J_{km}=\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m}=-a_me_k-b_mf_k$$

7.10　对于习题 7.7，试证明，对于 $m\neq k$，雅可比矩阵的非对角线元素为

$$N_{km}=\frac{\partial P_k}{\partial V_m}V_m=a_me_k+b_mf_k$$

$$L_{km}=\frac{\partial Q_k}{\partial V_m}V_m=a_mf_k-b_me_k$$

7.11　对于习题 7.7，试证明，对于雅可比矩阵 $m\neq k$ 的非对角线元素，有如下关系式：

$$\left.\begin{aligned}H_{km}&=L_{km}=a_mf_k-b_me_k\\ N_{km}&=-J_{km}=a_me_k+b_mf_k\end{aligned}\right\}\text{雅可比矩阵的非对角线元素}$$

对于雅可比矩阵 $m=k$ 的对角线元素，有如下关系式：

$$\left.\begin{aligned}H_{kk}&=-Q_k-B_{kk}V_k^2\\ L_{kk}&=Q_k-B_{kk}V_k^2\\ N_{kk}&=P_k+G_{kk}V_k^2\\ J_{kk}&=P_k-G_{kk}V_k^2\end{aligned}\right\}\text{雅可比矩阵的对角线元素}$$

7.12　对于习题7.7，证明每条母线 k 的 $P_{k(计算值)}$ 和 $Q_{k(计算值)}$ 可表示为

$$P_k = \sum_{m=1}^{n} [e_k(e_m G_{km} - f_m B_{km}) + f_k(e_m B_{km} + f_m G_{km})]$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^{n} [f_k(e_k G_{km} - f_m B_{km}) - e_k(e_m B_{km} + f_m G_{km})]$$

式中，$V_k = e_k + \mathrm{j}f_k$；$Y_{km}^* = G_{km} - \mathrm{j}B_{km}$；$V_m^* = e_m - \mathrm{j}f_m$。

7.13　假定一个电力系统网络的功率平衡方程可写为

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{P} + \mathrm{j}\boldsymbol{Q} = [\boldsymbol{V}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{I}^*] = [\boldsymbol{V}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{YV}]^*$$

式中，$\boldsymbol{S}$ 是注入复功率矢量，$\boldsymbol{P}$ 是注入有功功率矢量，$\boldsymbol{Q}$ 是注入无功功率矢量，$\boldsymbol{I}$ 是注入电流矢量，$\boldsymbol{V}$ 是母线电压矢量，$Y_{kj} = G_{kj} + \mathrm{j}B_{kj}$是系统导纳矩阵。

假定在极坐标系中，复数电压可写为

$$V_k = V_k(\cos\theta_k + \mathrm{j}\sin\theta_k)$$

试证明，有功功率和无功功率的计算值可表示为

$$P_{k(计算值)} = V_k \sum_{j=1}^{n} V_j(G_{kj}\cos\theta_{kj} + B_{kj}\sin\theta_{ij})$$

$$Q_{k(计算值)} = V_k \sum_{j=1}^{n} V_j(G_{kj}\sin\theta_{kj} - B_{kj}\cos\theta_{ij})$$

式中，$\theta_{kj} \approx \theta_k - \theta_j$。

在直角坐标系中，有功功率和无功功率的计算值可表示为

$$P_{k(计算值)} = e_k \sum_{j=1}^{n} (G_{kj}e_j - B_{kj}f_j) + f_k \sum_{j=1}^{n} (G_{kj}f_j + B_{ik}e_j)$$

$$Q_{k(计算值)} = f_k \sum_{j=1}^{n} (G_{kj}e_j - B_{kj}f_j) - e_k \sum_{j=1}^{n} (G_{kj}f_j + B_{kj}e_j)$$

式中，母线电压为 $V_k = e_k + \mathrm{j}f_k$。

7.14　考虑图7-27给出的馈电系统。

系统数据为 $V_1 = 1\angle 0°$，$Z_{25} = 5 + \mathrm{j}10\Omega$，$Z_{34} = 2 + \mathrm{j}8\Omega$，$Z_{23} = 5.41 + \mathrm{j}3.34\Omega$；$S_2 = 3\mathrm{MVA}$，$pf = 0.75$ 滞后；$S_3 = 3\mathrm{MVA}$，$pf = 0.8$ 滞后；$S_4 = 4\mathrm{MVA}$，$pf = 0.9$ 滞后；$S_5 = 2\mathrm{MVA}$，$pf = 0.9$ 滞后；T_1，63/20kV，10%电抗，20MVA；T_2 与 T_1 相同。

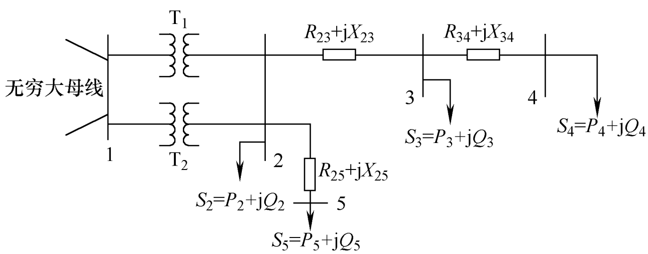


图7-27　习题7.14的馈电系统

进行以下计算：

1）计算等效标幺值电路模型。令使用的 S_{b} 等于变压器 T_1 的额定容量。

2）令 $V_1 = V_1\angle 0°$，$V_K = V_{RK} + \mathrm{j}V_{IK}$，$K = 2, 3, 4, 5$。推导在直角坐标系中每条母线的 $V_K = f(V_{RK}, V_{IK})$、ΔP_K 和 ΔQ_K 之间关系的表达式，$K = 2, 3, 4, 5$。使用高斯-赛德尔迭代法计算母线电

压和系统损耗。使用5次迭代，假定起始电压为 $V_K=1\angle 0°$，$K=2$，3，4，5。把结果画在一个表中。

3）计算矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$、$\boldsymbol{B}'$ 和 $\boldsymbol{B}''$，并使用快速解耦潮流法计算母线电压。创建一个表格，把结果与前述2）中的结果比较。使用5次迭代。

4）使用 FDLF 潮流法计算每条母线功率因数修正到1之后的电压。创建一个表格，把结果与前述3）中的结果比较。

7.15　考虑图7-28画出的五母线系统，五母线系统的母线数据见表7-11。

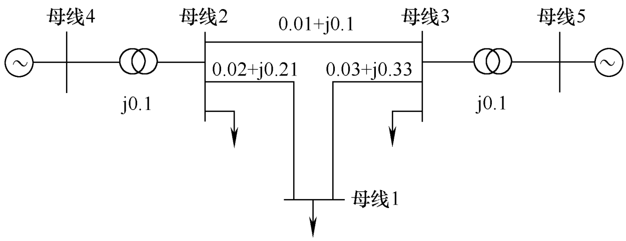


图7-28　习题7.15的系统

表7-11　五母线系统的母线数据

母线编号	母线类型	V_N/kV	V（pu）	θ/rad	P_G/MW	P_L/MW	Q_L/Mvar
1	PQ	138	—	—	—	160	80
2	PQ	138	—	—	—	200	100
3	PQ	138	—	—	—	370	130
4	PV	1	1.05	—	500	—	—
5	平衡母线	4	1.05	0.0	—	—	—

进行以下计算：

1）计算 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}=\boldsymbol{Y}_{\text{r}}+\text{j}\boldsymbol{Y}_{\text{i}}$（母线内导纳），即计算矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{r}}$ 和 $\boldsymbol{Y}_{\text{i}}$。

2）计算雅可比矩阵［$\boldsymbol{H}$，$\boldsymbol{N}$，$\boldsymbol{J}$，$\boldsymbol{L}$］

3）计算 $\Delta\boldsymbol{P}$ 和 $\Delta\boldsymbol{Q}$。

4）用牛顿-拉夫逊法解图7-28的五母线系统的潮流。

7.16　考虑图7-29㊀的电网。

1）母线1为平衡母线，$V_1=1\angle 0°$。

2）母线2为P-V母线，$|V_2|=1.05$，$P_{2(\text{预计值})}=0.9\text{pu}$。

3）母线2的 Q_2 假定为 $-1\leqslant Q_2\leqslant 2$。

用解耦牛顿-拉夫逊法计算母线电压。

7.17　考虑图7-30给出的电网。

令母线1为平衡母线，$V_1=1.05\angle 0°$；母线2为P-V母线，$P_2=0.20$，$|V_2|=0.96$。

计算：

1）矩阵 $\boldsymbol{B}'$、$\boldsymbol{B}''$ 和 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$。

㊀ 译者注：原文此处和后面有些图号标错，译文中已直接改正，不再一一标出。

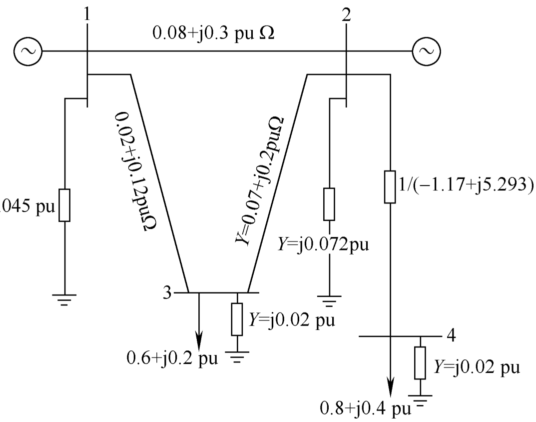


图 7-29　习题 7. 16 的系统

2）使用 1 次快速解耦潮流法迭代。假定起始电压为 $V_1=1.05\angle 0°$，$V_2=0.9\angle 2°$，$V_3=0.9\angle -1.2°$。系统损耗根据第 1 次迭代后得到的电压计算。

7. 18　考虑图 7-31 给出的系统。假定母线 1 接有一台燃气轮机，母线负荷为 1pu；该母线定为平衡母线，母线电压固定为 1pu。母线 2 接有几个 PV 发电设备，注入母线的总功率为 1. 5pu。输电线数据如图中给出的标幺值。母线 3 接有几个负荷，总功率为 2. 0pu。在 MATLAB 实验平台上编写程序进行如下计算，最大允许偏差为 0. 001。

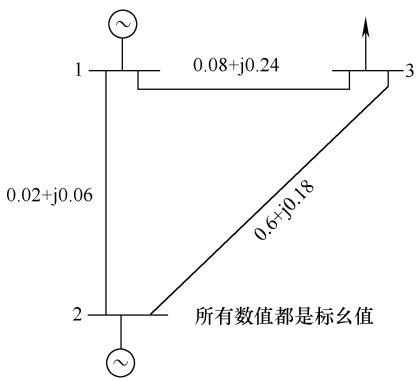


图 7-30　习题 7. 17 的电网

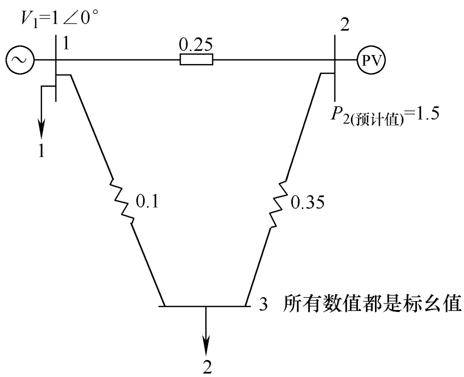


图 7-31　习题 7. 18 的单线图

1）计算系统的 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$。

2）用高斯-赛德尔 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Bus}}$ 法计算母线 2 和母线 3 的电压。

3）用高斯-赛德尔 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$ 法计算母线 2 和母线 3 的电压。

4）用牛顿-拉夫逊法计算母线 2 和母线 3 的电压。

5）创建表格，对上述方法进行比较。

6）确定平衡发电机提供的功率。

7）确定总功率损耗。

7. 19　考虑图 7-32 给出的系统。

假定 $V_1 = 1\angle 0°$（平衡母线）。假定给出的输电线阻抗为标幺值，其对应基值为 440V，100MVA（整个系统 $S_b = 100\text{MVA}$）。

还假定发电机和负荷的预计值为

1）母线 1：#1 负荷，4MVA，$pf = 0.85$ 滞后。

2）母线 2：G2，2MW，$pf = 0.95$ 滞后；#2 负荷，4MVA，$pf = 0.90$ 超前。

3）母线 3：G3，1MW，$pf = 0.95$ 超前；#3 负荷，2MVA，$pf = 0.90$ 超前。

用解耦牛顿-拉夫逊法和高斯-赛德尔法计算母线电压。

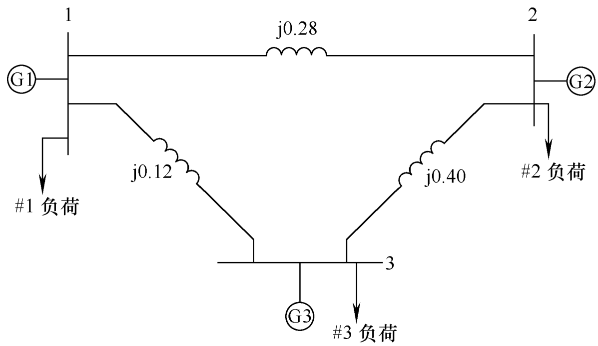


图 7-32　习题 7.19 的电网

7.20　考虑图 7-33 的系统。

假定发电机的内电抗标幺值为 0.8，负荷电压为 1pu。计算：

1）短路研究用的 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 模型。

2）短路研究用的 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$ 模型。

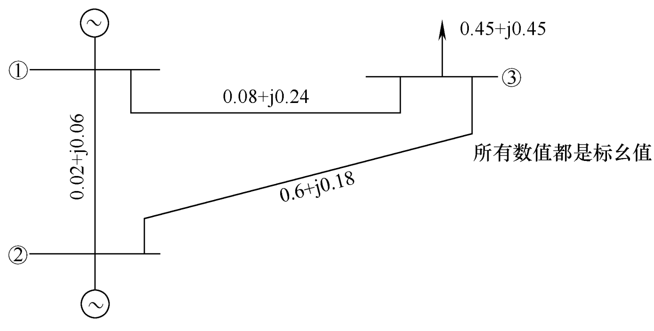


图 7-33　习题 7.20 的系统

7.21　对于图 7-34 给出的辐射状系统，进行以下计算：

1）对于 500W 负荷，哪条母线应视为无穷大母线？

2）假如负荷电压保持为它的额定值，哪条母线应视为无穷大母线？

7.22　考虑图 7-35 给出的微电网。

输电线阻抗给出的标幺值对应的基值为 100MVA（整个系统 $S_b = 100\text{MVA}$）。发电及负荷的

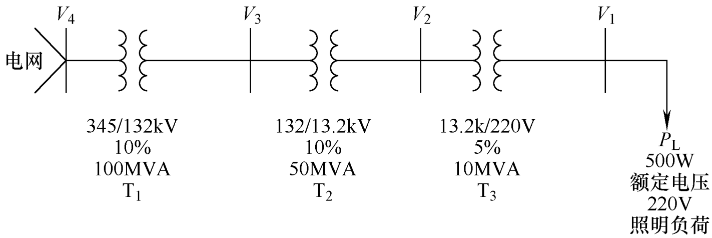


图 7-34 习题 7. 21 的系统

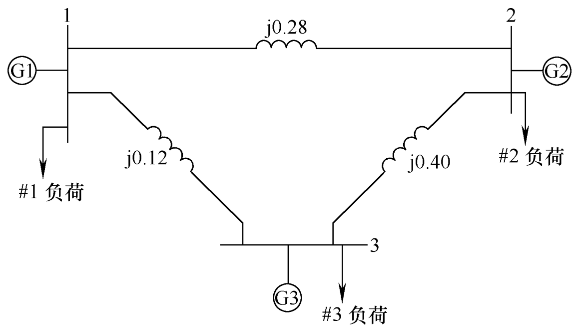


图 7-35 习题 7. 22 的系统（所有数值都是标幺值）

预计值为

1）母线 1：#1 负荷，4MVA，$pf = 0.85$ 滞后。

2）母线 2：G2，2MW，$pf = 0.95$ 滞后，$X = 10\%$；#2 负荷，4MVA，$pf = 0.90$ 超前。

3）母线 3：G3，1MW，$pf = 0.95$ 超前，$X = 25\%$；#3 负荷，2MVA，$pf = 0.90$ 超前。

进行以下计算：

1）用 FDLF 潮流法计算母线负荷电压。

2）计算每个负荷的阻抗。

参 考 文 献

1. Gross AC. Power system analysis. Hoboken, NJ: Wiley; 1986.
2. Grainger J, Stevenson WD. Power systems analysis. New York: McGraw Hill; 2008.
3. Dommel H, Tinny W. Optimal power flow solution. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1968; PAS-87(10):1866–1876.
4. Duncan Glover J, Sarma MS. Power system analysis and design. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Thomson Learning; 2002.
5. Weedy RM. Electric power systems. Hoboken, NJ: Wiley; 1970.
6. Heydt GT. Computer analysis methods for power systems. New York: Macmillan; 1986.
7. Stagg G, El-Abiad A. Computer methods in power system analysis. New York: McGraw Hill; 1968.

8. Tinney WF, Hart CE. Power flow solution by Newton's method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1967; PAS-86:1449–1456.
9. Stott B. Review of load-flow calculation methods. Proceedings of the IEEE 1974; 62(7):916–929.
10. Chabert J-C, Barbin E. A history of algorithms: from the pebble to the microchip. New York/Heidelberg/ Berlin: Springer; 1999.
11. Khayyám, O. Rubáiyát of Omar Khayyám: A critical edition (FitzGerald E, Trans., Decker C, Ed.). Charlottesville, VA: University of Virginia Press; 1997.

补 充 文 献

Adamiak M. Phasor measurement overview. Available at http://phasors.pnl.gov/Meetings/2004%20January/Phasor%20Measurement%20Overview.pdf. Accessed 2010 Oct 24.

Anderson PM, Fouad AA. Power system control and stability. 1st ed. Ames, IA: Iowa State University Press; 1977.

Bergen A, Vittal V. Power systems analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 2000.

Bohn R, Caramanis M, Schweppe F. Optimal pricing in electrical networks over space and time. Rand Journal on Economics 1984; 18(3):360–376.

Elgerd OI. Electric energy system theory: an introduction. 2d ed. New York: McGraw-Hill; 1982.

El-Hawary, Mohamed E. Electric power systems: design and analysis. Reston, VA: Reston Publishing; 1983.

Energy Information Administration, Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov. Accessed 2010 Oct 7.

IEEE Brown Book. IEEE recommended practice for power system analysis. New York: Wiley-Interscience; 1980.

Institute for Electric Energy. Homepage. Available at http://www.edisonfoundation.net/IEE. Accessed 2010 Oct 7

Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 1451.1-1999, standard for a smart transducer interface for sensors and actuators–network capable application processor (NCAP) information model. Piscataway, NJ: IEEE; 1999.

Masters GM. Renewable and efficient electric power systems. New York: Wiley; 2004.

Midwest ISO. Available at http://toinfo.oasis.mapp.org/oasisinfo/MMTA_Transition_Plan_V2_3.pdf. Accessed 2010 Jan 12.

North American Electric Reliability Corp. (NERC). NERC 2008 Long-Term Reliability Assessment 2008–2017. Available at http://www.nerc.com/files/LTRA2008.pdf. Accessed 2010 Oct 8.

Nourai A, Schafer, C. Changing the electricity game. IEEE Power and Energy Magazine 2009; 7(4):42–47.

Phadke AG. Computer applications in power. IEEE Power & Energy Society 1993; 1(2):10–15.

Sauer P, Pai MA. Power systems dynamics and stability. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1998.

Schweppe FC, Wildes J. Power system static-state estimation, part I: exact model. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1970; PAS-89(1):120–125.

Shahidehpour M, Yamin H. Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management. New York/Piscataway, NJ: Wiley/IEEE; 2002.

Wood AJ, Wollenberg, BF. Power generation, operation, and control. New York: Wiley; 1996.

第 8 章　电网和微电网故障研究

8.1　引言

电网故障指会导致非正常运行的任何条件。系统带电部分意外接地，两相导线接触或导线断线等情况发生时，都会导致电网故障。例如，当输电线由于雷暴产生的闪电等气候原因而意外接地时，会产生绝缘闪络，导致很大的故障电流流过。

电网故障或短路时，所有同步发电机都会直接向故障点提供电流，直至保护设备动作，将故障尽快隔离。如果故障电流不被隔离，电网保护系统就会使发电机跳闸，其结果是系统负荷与发电之间失去平衡，系统失去稳定。多数停电都是由系统不稳定引起的。电网必须设计为能在系统运行中可预见的最大故障电流下，成功隔离故障，保持运行。如果故障电流超出断路器遮断大故障电流从而保护电网的能力，则其结果是灾难性的故障、火灾，以及大部分电网基础设施的永久性损坏。因此，在分布式发电的微电网接入当地电网之前，必须计算故障电流贡献，在接入前采取缓解措施。

在电网故障研究中，假定除故障点外，电网是平衡的。因此，故障发生时，电网必须保持平衡。故障一旦发生，电网的故障部分必须尽快被隔离并退出运行。因此，在电网故障研究中，使用的是“如果-则”条件：如果电网的一点发生故障，则希望计算故障电流，并通过把系统故障部分隔离的方法保护电网设备[1-7]。

本章的题目是电网故障研究。在故障研究中，我们将学习如何把三相网络模拟为正序、负序和零序网络。

多数故障是单线对地或双线故障后接地。对于涉及接地的不平衡故障电流计算，需要使用正序、负序和零序网络。平衡三相故障也被用于断路器定容。平衡故障计算需要使用正序网络。

本章末尾将给出解题算例和习题，内容有平衡分量；正序、负序、零序网络；平衡三相故障建模；单相对地、双相对地故障，两线间故障等。

8.2　电网故障电流计算

图 8-1 是一个电网及它的配套断路器。电网元件包括发电机、变压器、输电线等——它们都需要保护，如果发生故障，故障电流要用断路器隔离。例如，如果风暴引发了故障，比如说母线 3 和母线 4 之间的线路发生了故障，它们的断路器都要

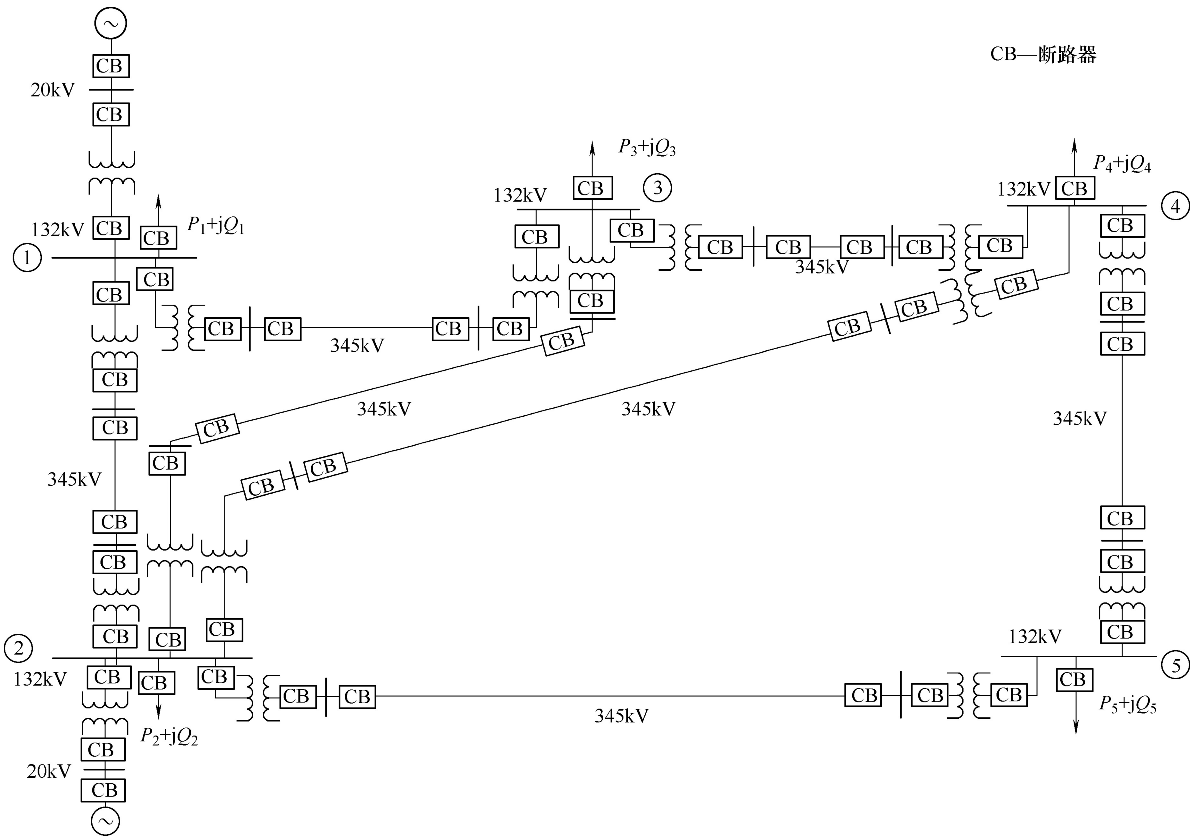


图 8-1　某个电网及它的配套断路器

由来自接地故障电流检测系统的继电器发出的控制操作开断。短路研究的主要目的是确定每个操作位置的断路器的功率遮断能力。为确定断路器需要的遮断能力，要假定在每条母线发生三相故障来计算最大故障电流。连到母线的所有断路器都必须能切断故障电流。发出控制指令的继电保护系统必须确定电网很多位置的平衡故障和非平衡故障的电压和电流。

为计算三相平衡故障和非平衡故障产生的流过电网的短路电流，电网系统模拟必须能反映研究意图。故障类型是三相平衡故障和非平衡故障。图 8-2 是一个显示了 a、b、c 三相的电网母线上的平衡故障。平衡电网中 a、b、c 三相的电流之和为零。因此中性点电流为零。该电流用 I_n 表示：

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

如果系统不平衡，则会有中性点电流流经中性点导线。然而，如果平衡电网发生平衡故障，把三相连接到一起的中性点仍将处于零电位，且没有中性点电流流过。即

$$I_n = 0$$

图 8-2 中用字母“W”标出的虚线画出了有故障部分的三相系统。

图 8-3 表示的是单线对地故障。对于单线对地故障的“如果-则”研究来说，故障在哪一相是随意的。但在单线对地故障研究中，习惯上把故障相定为 a 相，而其他两相则正常运行。图 8-3 中用字母“W”标出的虚线标出了故障相。因为 a 相是故障相，所以接地电流等于 a 相的故障电流。

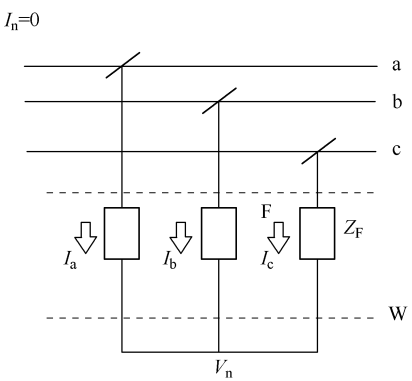


图 8-2　平衡三相故障

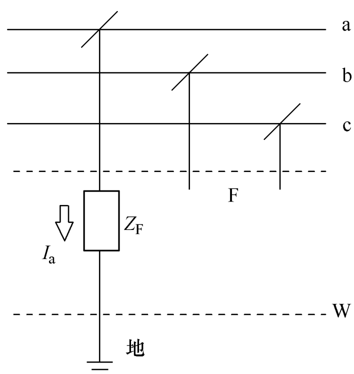


图 8-3　不平衡故障：单线对地

图 8-4 画出的是双线对地故障。对于双线对地故障的“如果-则”研究来说，故障在哪两相也是随意的。但在双线对地故障研究中，习惯上把故障相定为 b 相和 c 相，而 a 相则正常运行。图 8-4 中用字母“W”标示的虚线标出了三相系统的故障部分和故障相。因为 b 相和 c 相发生了对地故障相，所以接地电流等于 b 相和 c 相的故障电流之和。

图 8-5 画出的是双线间故障。对于双线间故障的“如果-则”研究来说，故障在哪两相也是随意的。但在双线间故障研究中，习惯上把故障相定为 b 相和 c 相，而 a 相则正常运行。图 8-5 中用字母“W”标示的虚线标出了三相系统的故障部分和故障相。因为 a 相和故障相都不接地，所以没有地电流流过。故障电流等于 b 相电流。c 相电流是 b 相电流的负值。要计算故障电流，必须用对称分量法模拟系统。后面将研究这一课题。

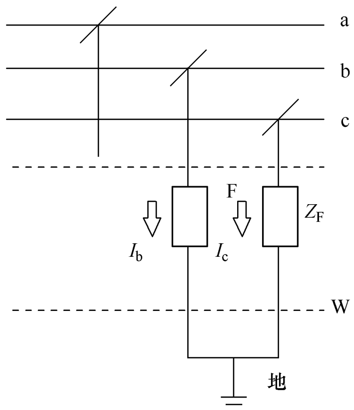


图 8-4　不平衡故障：双线对地

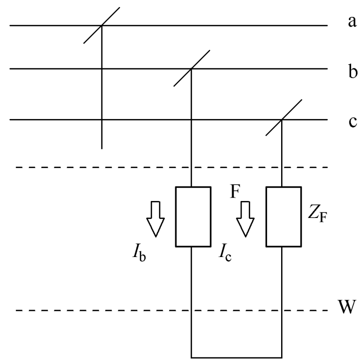


图 8-5　不平衡故障：双线之间

8.3　对称分量法

1918 年，弗特斯克（Charles Legeyt Fortescue）[8]描述了如何用对称的 3 组平衡相量之和表示一组 3 个不平衡相量。这 3 组相量定义为正序、负序和零序相量。弗特斯克法的实质是把 3 个不平衡相量变换为 3 组独立平衡相量。尽管实际电网并不完全平衡，但平衡近似是一种可接受的工程解决方法。

在平衡系统中，假定电网的每个元件都是平衡的。发电机被指定发出一组平衡电压：所有各相电压幅值相同，相位相差 120°。同样，三相输电线也是平衡的：各条线的阻抗和导纳都相等。然而，实际上，线路的间隔可能并不相同；因此会导致电感不平衡，从而导致阻抗不平衡。然而，线路悬挂在输电线杆塔或电杆上时会换位，即每几英里 a 相、b 相和 c 相的位置会变换一次。这会使它们的间隔近似平衡，因而单位长度的电感也会大致平衡。三相变压器和负荷也是平衡的。三相输电线换位已在第 2 章讨论过。

二次配电系统的负荷是不平衡的。然而，作为初步近似，可以假定负荷也是平衡的，因为电网被设计为平衡系统。因此，如前一章讨论的，对三相平衡系统的分析可以用分析 a 相对地的方式进行。然而，如果系统的线路在风暴中损坏并落到地

上，系统就变为不平衡。不平衡系统可使用电网的对称分量来分析。例如，在线对地故障时，可以计算地电流，然后把保护系统设置为将线路两端的断路器分断，把故障隔离。然而，故障隔离需要在极短时间（几个周波）内完成，以防止电网设备损坏。这一要求是说，系统必须在故障过程中保持平衡；只有故障段是电网的不平衡部分。这是故障电流计算的关键概念。首先需要开发平衡系统的阻抗模型来模拟各种故障类型。一旦做到了这一点，就可以更好理解如何构建故障系统模型。

把三相系统用正序、负序和零序来表示[1-7]，就引入了对称分量的基本概念。通常用符号“1”或“+”代表电压、电流和阻抗的正序变量。三相平衡电压可以用图 8-6 表示。

图 8-6 表示的正序电压以 a 相为基准，随后是 b 相和 c 相。各相电压可用以下公式表示：

$$V_a = V_{a_1} = V\angle 0° = V_1\angle 0° \tag{8-1}$$

$$V_b = V_{b_1} = V_1\angle 240° \tag{8-2}$$

$$V_c = V_{c_1} = V_1\angle 120° \tag{8-3}$$

令 $a = 1\angle 120°$，$a^2 = 1\angle 240°$，则

$$V_{a_1} = V_1 \qquad V_{b_1} = a^2 V_1 \qquad V_{c_1} = aV_1 \tag{8-4}$$

把以上各式改写为矩阵形式，有

$$\begin{bmatrix} V_{a_1} \\ V_{b_1} \\ V_{c_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} V_1 \tag{8-5}$$

负序电压用“2”或“-”号作为上标或下标来表示。负序电压如图 8-7 所示。

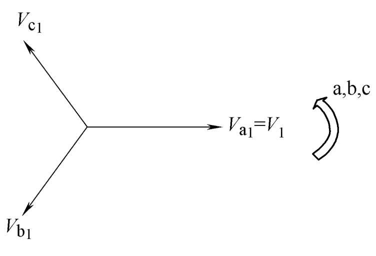


图 8-6　用正序量表示的三相电压

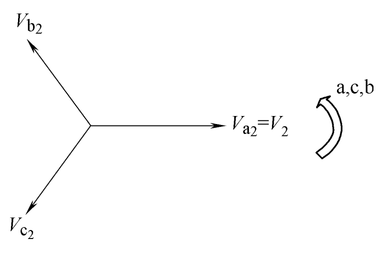


图 8-7　用负序量表示的三相电压

由图 8-7，可写出如下公式：

$$V_{a_2} = V_2 \tag{8-6}$$

$$V_{b_2} = aV_2 \tag{8-7}$$

$$V_{c_2} = a^2 V_2 \tag{8-8}$$

上述公式的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} V_{a_2} \\ V_{b_2} \\ V_{c_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} V_2 \tag{8-9}$$

零序电压用一组相位相同的电压表示。零序电压用“0”表示。零序电压为

$$V_{a_0} = V_0 \tag{8-10}$$

$$V_{b_0} = V_0 \tag{8-11}$$

$$V_{c_0} = V_0 \tag{8-12}$$

用以上表示法可以将一组三相电压表示为它的相序电压。一般来说，一组不平衡电压 V_a、V_b 和 V_c 可写为

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \Rightarrow V_a = V_0 + V_1 + V_2 \tag{8-13}$$

$$V_b = V_{b_0} + V_{b_1} + V_{b_2} \Rightarrow V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \tag{8-14}$$

$$V_c = V_{c_0} + V_{c_1} + V_{c_2} \Rightarrow V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \tag{8-15}$$

以上公式的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{8-16}$$

可以把矩阵变换用 $\boldsymbol{T}$ 表示，并表示为

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{8-17}$$

因此，三相电压可以用它的相序变量表示如下：

$$[\boldsymbol{V}_{abc}] = [\boldsymbol{T}][\boldsymbol{V}_{012}] \tag{8-18}$$

可以用矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的逆乘以上式：

$$\begin{aligned} [\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{V}_{abc}] &= [\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{T}][\boldsymbol{V}_{012}] \\ [\boldsymbol{V}_{012}] &= [\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{V}_{abc}] \\ [\boldsymbol{T}]^{-1} &= 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8-19}$$

因此，相序电压为

$$\begin{aligned} V_0 &= 1/3(V_a + V_b + V_c) \\ V_1 &= 1/3(V_a + aV_b + a^2 V_c) \\ V_2 &= 1/3(V_a + a^2 V_b + aV_c) \end{aligned} \tag{8-20}$$

同样可以用三相电流计算电流的相序分量：

$$[\boldsymbol{I}_{abc}]=[\boldsymbol{T}][\boldsymbol{I}_{012}]$$
$$[\boldsymbol{I}_{012}]=[\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{I}_{abc}] \tag{8-21}$$

例 8.1　考虑一台平衡Y联结的发电机（见图 8-8）。计算它的正序、负序和零序电压。

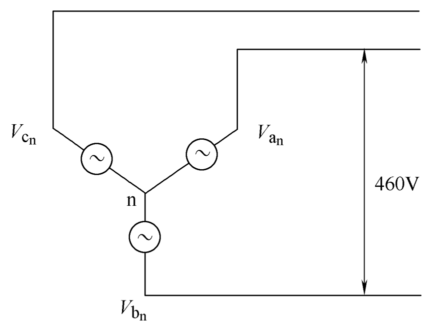


图 8-8　例 8.1 的三相发电机

解

假定 a 相选为基准相。a、b、c 相的电压为

$$V_{a_n}=\frac{460}{\sqrt{3}}\angle 0°=265.9\angle 0°$$
$$V_{b_n}=265.9\angle 240°=265.9a^2$$
$$V_{c_n}=265.9\angle 120°=265.9a$$

算得的相序电压为

$$\begin{bmatrix}V_0\\V_1\\V_2\end{bmatrix}=1/3\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{a_n}\\V_{b_n}\\V_{c_n}\end{bmatrix} \tag{8-22}$$

$$V_0=1/3(265.9+265.9a^2+265.9a)$$
$$=\frac{265.9}{3}(1+a+a^2)=0\Rightarrow V_0=0$$

因为 $1+a+a^2=0$，所以

$$V_1=1/3(265.9+265.9a^3+265.9a^3)$$

因为 $a^3=1\angle 0°$，所以 $V_1=265.9\angle 0°$。

因为 $a^4=a=1\angle 120°$，所以负序电压为

$$V_2=1/3(265.9+265.9a^4+265.9a^2)$$
$$V_2=1/3[265.9(1+a+a^2)]=0$$

可以得出结论是，对于三相平衡电压，正序电压是电网的唯一电源。

三相系统到对称分量的变换可用于表示两个系统的关系。用 a、b、c 相表示的三相功率为

$$S_{3\varphi}=[V_aI_a^*+V_bI_b^*+V_cI_c^*] \tag{8-23}$$

它的矩阵形式为

$$S_{3\varphi}=[\boldsymbol{V}_{abc}]^{T}[\boldsymbol{I}_{abc}]^*$$

可以对电压和电流都进行对称变换，求出对称系统的功率为

$$S_{3\varphi}=[\boldsymbol{V}_{012}]^{T}[\boldsymbol{T}]^{T}[\boldsymbol{T}]^*[\boldsymbol{I}_{012}]^*$$
$$S_{3\varphi}=3[V_0I_0^*+V_1I_1^*+V_2I_2^*]=3[\boldsymbol{S}_{012}] \tag{8-24}$$

8.4 发电机的相序网络

图 8-9 是一台同步发电机的阻抗模型。阻抗 Z_n 是接地阻抗。它的功能是限制发电机发生接地故障时的故障地电流。模型表示的是发电机稳态运行状态。该模型中，机轴转速 ω_m 和励磁电流 I_f 都是不变的。发电机提供的是平衡三相电压。使用图 8-9 的等效模型可写出如下公式：

$$
\begin{aligned}
E_a &= (R_a + jX_s + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_c + V_a \\
E_b &= (R_a + jX_s + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_c + V_b \\
E_c &= (R_a + jX_s + Z_n)I_c + (jX_m + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + V_c
\end{aligned} \tag{8-25}
$$

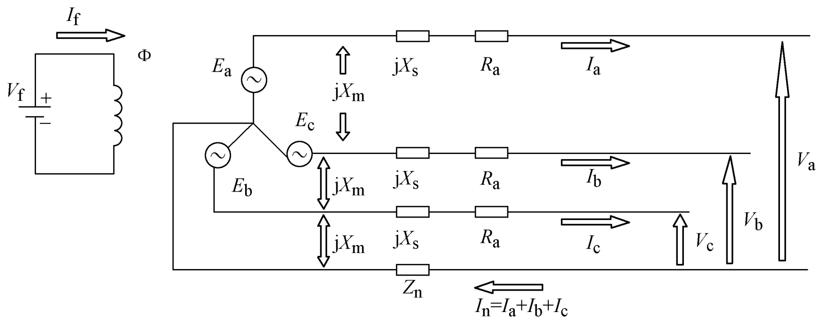


图 8-9 一台同步发电机的阻抗模型

假如发电机提供的是图 8-10 所示的平衡三相电压。每相提供的电压可表示为

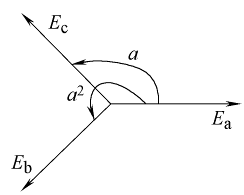


图 8-10 三相平衡发电机

$$
\begin{aligned}
E_a &= E \\
E_b &= a^2 E \\
E_c &= aE
\end{aligned} \tag{8-26}
$$

Z_s 和 Z_m 可改写为

$$Z_s = R_a + jX_s + Z_n$$
$$Z_m = jX_m + Z_n$$

则式（8-25）给出的方程组可写为

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{8-27}$$

式（8-27）方程组的矩阵形式为

$$[\boldsymbol{E}_{abc}] = [\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{I}_{abc}] + [\boldsymbol{V}_{abc}] \tag{8-28}$$

将 $[\boldsymbol{I}_{abc}] = [\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{I}_{012}]$ 代入式（8-28），然后左乘以 $[\boldsymbol{T}_s]^{-1}$，得

$$[\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{E}_{abc}] = [\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{I}_{012}] + [\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{V}_{abc}] \tag{8-29}$$

再复习一下如下的 abc 到 012 的变换：

$$[\boldsymbol{T}_s]^{-1} \cdot [\boldsymbol{E}_{abc}] = [\boldsymbol{T}_s]^{-1} \cdot [\boldsymbol{T}_s] \cdot [\boldsymbol{E}_{012}]$$

$$[\boldsymbol{E}_{012}] = [\boldsymbol{T}_s]^{-1} \cdot [\boldsymbol{E}_{abc}]$$

$$[\boldsymbol{T}_s]^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

因为发电机提供的是三相平衡电压，所以式（8-27）[㊀]右侧可写成式（8-30）给出的发电机相序电压。

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = \frac{E}{3}\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8-30}$$

表达式 $[\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}] = [\boldsymbol{Z}_{012}]$ 可改写成式（8-31）：

$$[\boldsymbol{T}]^{-1}[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}] = [\boldsymbol{Z}_{012}] = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \tag{8-31}$$

式中，$Z_0 = Z_{0,Gen} + 3Z_n$，而 $Z_{0,Gen} = R_a + j(X_s + 2X_m)$，则

$$\begin{aligned} Z_0 &= R_a + j(X_s + 2X_m) + 3Z_n \\ Z_1 &= Z_s - Z_m = R_a + j(X_s - X_m) \\ Z_2 &= Z_s - Z_m = R_a + j(X_s - X_m) \end{aligned} \tag{8-32}$$

现在式（8-27）可写为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{8-33}$$

用上述方程组可得到如下正序、零序和负序网络（见图 8-11）：

㊀ 译者注：原文此处和后面有些公式编号写错，译文已直接改正，不一一标出。

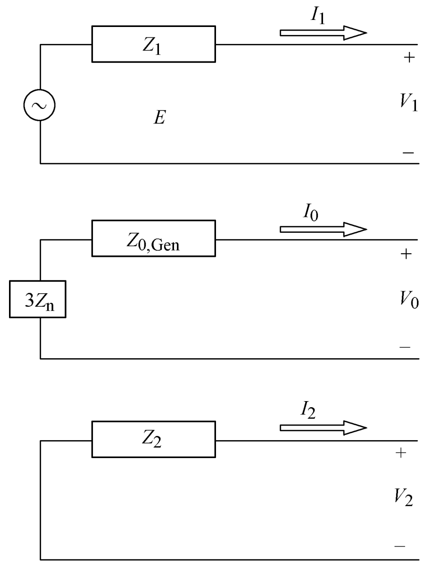


图 8-11　发电机的正序、零序和负序网络

$$Z_1I_1+V_1=E$$
$$Z_0I_0+V_0=0$$
$$Z_2I_2+V_2=0$$

因此，当三相发电机提供三相平衡电压时，仅正序网络被正序电压激励，与三相系统的 a 相情况相同。

8.5　光伏发电站建模

第 5 章研究了光伏（PV）发电组件的建模。PV 组件的输入阻抗是纯阻性的；它是输入辐照度和组件温度的函数。第 3 章研究了 DC/AC 逆变器的运行。逆变器用理想功率开关模拟。因为逆变器的 DC 侧运行于零频率，而 AC 侧运行于电网频率，所以 AC 侧的干扰对 DC 侧的影响很有限。实际上，逆变器封锁了干扰的传播。同时，因为没有能量惯性，PV 方阵的存储能量仅限于辐照能量，所以 PV 对故障电流的贡献相当小。因此，PV 发电站的输入阻抗很高。图 8-12 和图 8-13 画出的是 PV 发电站。要估计 PV 发电站的故障电流贡献，需要根据测量得到的运行数据模拟 PV 发电站的输入阻抗。目前，人们正在对 PV 发电站建模进行研究。读者可以在美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）的网站 www. nrel. gov 找到 PV 和风电系统的最新模型。然而，对于运行于最高电压和电流的 PV 发电站，可以放心地使用第 5 章开发的模型作为高阻抗模型。

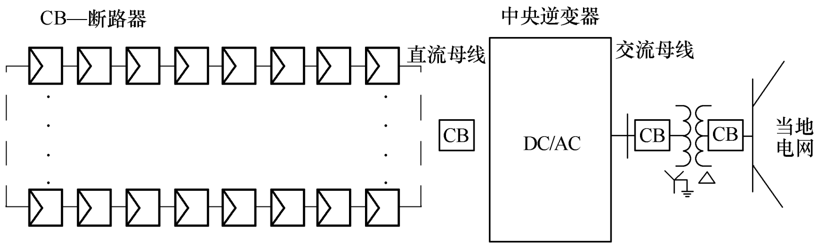


图 8-12　一个大型光伏发电站接线的 DC/AC 中央逆变器

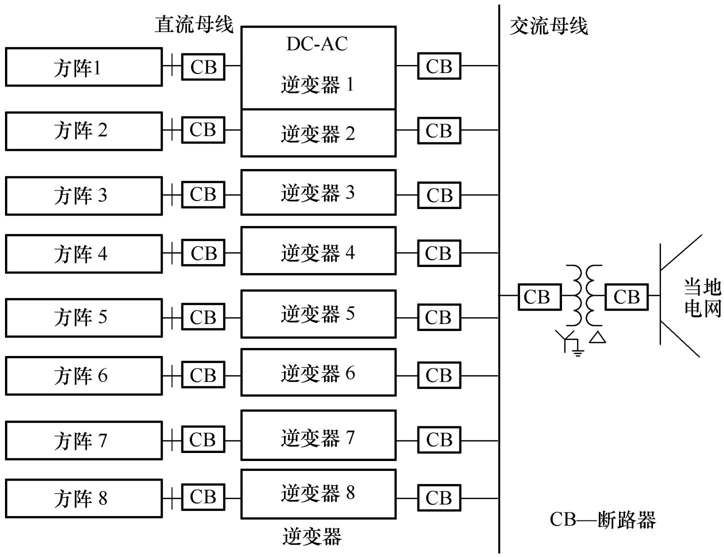


图 8-13　带逆变器的光伏方阵的一般结构

8.6　平衡三相输电线的相序网络

图 8-14 是输电线的平衡三相网络模型。代表线路压降的电压表达式如式(8-34)所示。

$$
\begin{aligned}
V_a &= jX_sI_a + jX_mI_b + jX_mI_c + V_a' \\
V_b &= jX_sI_b + jX_mI_a + jX_mI_c + V_b' \\
V_c &= jX_sI_c + jX_mI_a + jX_mI_b + V_c'
\end{aligned}
\tag{8-34}
$$

该方程组可表示为紧凑的矩阵形式如下：

$$
\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a' \\ V_b' \\ V_c' \end{bmatrix} = j\begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}
\tag{8-35}
$$

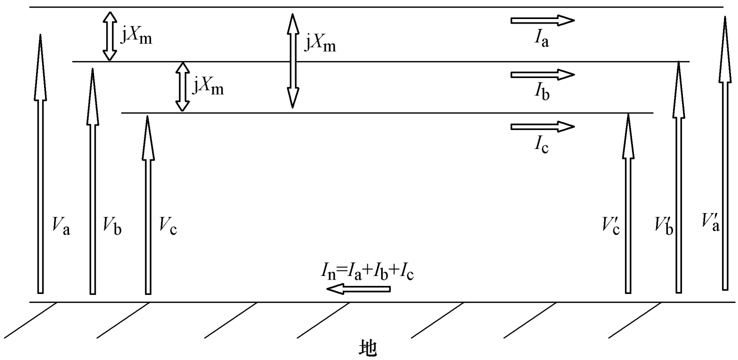


图 8-14 平衡三相输电电抗模型

$$[\boldsymbol{V}_{abc}]-[\boldsymbol{V}'_{abc}]=[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{I}_{abc}] \tag{8-36}$$

$$[\boldsymbol{V}_{abc}]=[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{V}_{012}] \tag{8-37}$$

$$[\boldsymbol{I}_{abc}]=[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{I}_{012}] \tag{8-38}$$

用式（8-37）替代 $\boldsymbol{V}_{abc}$，用式（8-38）替代 $\boldsymbol{I}_{abc}$，可得

$$[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{V}_{012}]-[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{V}'_{012}]=[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{I}_{012}] \tag{8-39}$$

将式（8-39）两边左乘以 $[\boldsymbol{T}_s]^{-1}$，得

$$[\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{V}_{012}]-[\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{V}'_{012}]=[\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}_s][\boldsymbol{I}_{012}]$$

因为乘以 $[\boldsymbol{T}_s]^{-1}$ $[\boldsymbol{T}_s]$ 得到的是同一矩阵，所以

$$[\boldsymbol{V}_{012}]-[\boldsymbol{V}'_{012}]=[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{I}_{012}] \tag{8-40}$$

$$[\boldsymbol{Z}_{012}]=[\boldsymbol{T}_s]^{-1}[\boldsymbol{Z}_{abc}][\boldsymbol{T}_s]$$

$$\boldsymbol{Z}_{012}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{bmatrix}\mathrm{j}\begin{bmatrix}X_s&X_m&X_m\\X_m&X_s&X_m\\X_m&X_m&X_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix} \tag{8-41}$$

式（8-41）可简化为

$$\boldsymbol{Z}_{012}=\frac{\mathrm{j}}{3}\begin{bmatrix}X_s+2X_m&X_s+2X_m&X_s+2X_m\\X_s-X_m&aX_s+(1+a^2)X_m&a^2X_s+(1+a)X_m\\X_s-X_m&a^2X_s+(1+a)X_m&aX_s+(1+a^2)X_m\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}$$

进一步简化，得

$$\boldsymbol{Z}_{012}=\mathrm{j}\begin{bmatrix}X_s+2X_m&0&0\\0&X_s+2X_m&0\\0&0&X_s-2X_m\end{bmatrix} \tag{8-42}$$

所以，输电线对称相序网络模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_0 \\ \boldsymbol{V}_1 \\ \boldsymbol{V}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{V}'_0 \\ \boldsymbol{V}'_1 \\ \boldsymbol{V}'_2 \end{bmatrix} = \mathrm{j}\begin{bmatrix} X_s + 2X_m & 0 & 0 \\ 0 & X_s - X_m & 0 \\ 0 & 0 & X_s - X_m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{8-43}$$

零序、正序和负序模型网络为

$$Z_0 = 零序阻抗 = \mathrm{j}(X_s + 2X_m) \tag{8-44}$$

$$Z_1 = 正序阻抗 = \mathrm{j}(X_s - X_m) \tag{8-45}$$

$$Z_2 = 负序阻抗 = \mathrm{j}(X_s - X_m) \tag{8-46}$$

图 8-15 画出了输电线的零序、正序、负序电路模型的相序网络。

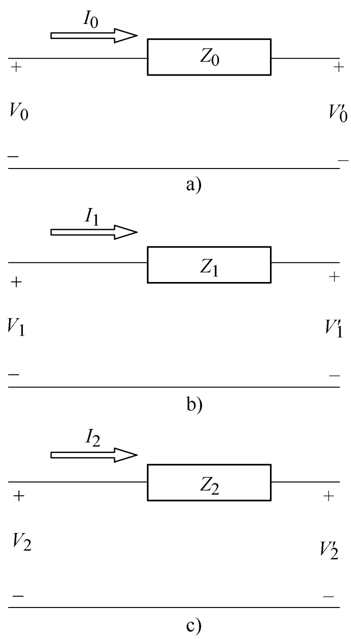


图 8-15　输电线的相序网络

a）零序　b）正序　c）负序

8.7　平衡三相变压器的地电流

电网的中性点通常是接地的。如果中性点和接地点之间没有接地阻抗，则地和中性点通常是同一电气点。连接电网中性点与地的导线通常不承载负荷电流；它的作用是检测故障接地电流。如果电网发生故障，且故障母线接地，则首先关注的问题是故障节点电流会如何流过电网。

变压器的高压侧与低压侧之间没有电气连接。变压器两侧感应的电压是由相应绕组的磁耦合产生的。考虑图 8-16 画出的Y-Y联结变压器。假定施加到三相变压器上的三相电压是不平衡的。

假定变压器在高压侧接地，而低压侧不接地，如图 8-16 所示。问题是当发电机侧（高压侧）接地而低压侧不接地时，是否有地电流流过变压器。为回答这一问题，需要回想一下，变压器低压侧的电压是由磁感应引起的，它产生的电流必须服从基尔霍夫电流定律。这意味着电流必须回到它的电源。因此，地电流既不能流过高压侧，也不能流过低压侧。如果地电流在低压侧，它必须在低压侧回到中性点。然而，如果低压侧不接地，它就无法形成完整回路。因此，如果不存在地电流的路径，低压侧中性点的电位值就将满足如下公式：

$$V_n = V_{an} + V_{bn} + V_{cn} \tag{8-47}$$

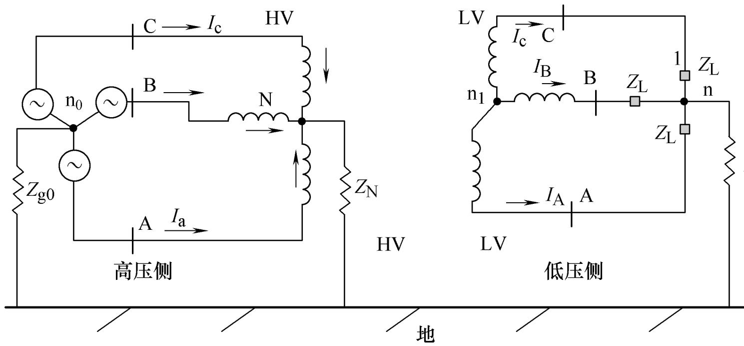


图 8-16 Y-Y联结的变压器，高压侧接地，低压侧不接地

出于同样理由，地电流也不能流过高压侧。如果没有地电流流过高压侧，磁耦合就必须在低压侧感应出三相电压，在低压侧产生相电流。这些相电流相加会使低压侧产生地电流。但是低压侧又是不接地的，所以低压侧电压会如式（8-47）那样相加。

现在考虑一种高低压侧都接地，地电流可以如图 8-17 那样在两侧都存在的情况。

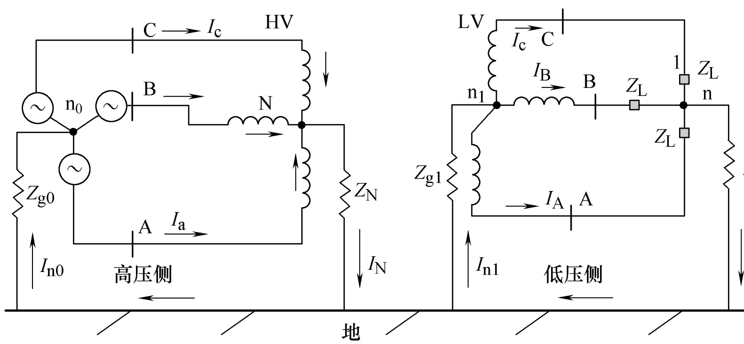


图 8-17 Y-Y联结的变压器，高低压侧都接地

8.8 零序网络

8.8.1 变压器

对于一侧中性点接地，而另一侧中性点不接地的情况，得到的结论是没有地电

流流过，因为在不接地侧不存在大地路径，如图 8-18a 所示。此外，如果Y-Y联结变压器的两侧中性点都接地，就会有地电流流过，如图 8-18b 所示。图 8-18b 的箭头表示电流流动及它们产生的地电流 I_n 的方向。图 8-18b 显示一台变压器在一侧施加了不平衡电压，产生了三相电流不平衡导致的电流 $I_n = I_a + I_b + I_c$。如图 8-18b

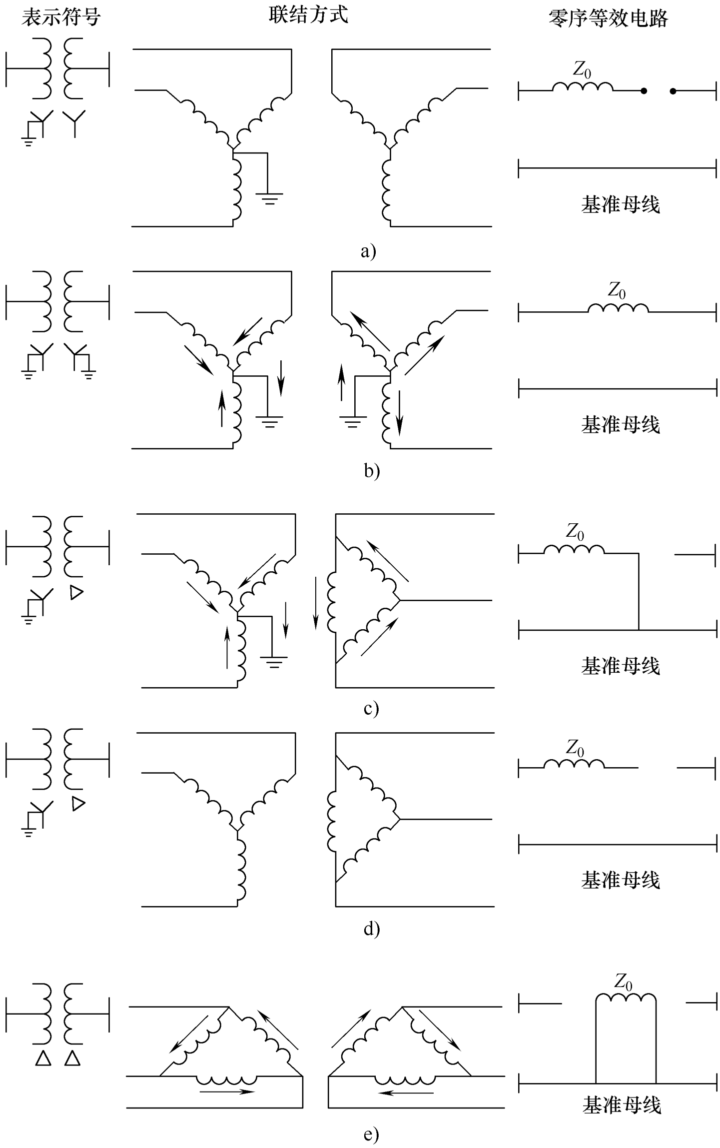


图 8-18　三相变压器组的零序等效电路

a）Y-Y联结变压器组，一侧接地　b）Y-Y联结变压器组，两侧都接地　c）Y-△联结变压器组，Y侧接地　d）不接地Y-△联结变压器组　e）△-△联结变压器组

所示，地电流 I_n 流经接地导线；箭头是朝下的。在图 8-18b 的变压器另一侧，不平衡电压导致地电流从地中流出，$I_n = I_a + I_b + I_c$。当然，变压器两侧地电流的关系由变压器匝数比决定。

图 8-18c 画出的是接地Y-△联结变压器。这种情况下，地电流会流过接地Y侧，因为在变压器△侧存在循环电流。还应该记住，如果不平衡三相电压施加到接地Y侧，就为地电流的流动创建了一个大地通道，如图 8-18c 所示。图 8-18d、e 分别画出了不接地Y-△联结和△-△联结的情况。

如果为它建立了通道，地电流就会流过；然而对于变压器，必须记住法拉第感应定律、基尔霍夫电流定律和地电流流动的规律。

8.8.2　负荷联结

图 8-19a 画出了一个不接地Y联结负荷的零序网络。从不接地负荷的零序网络可以看出，没有地电流流过。

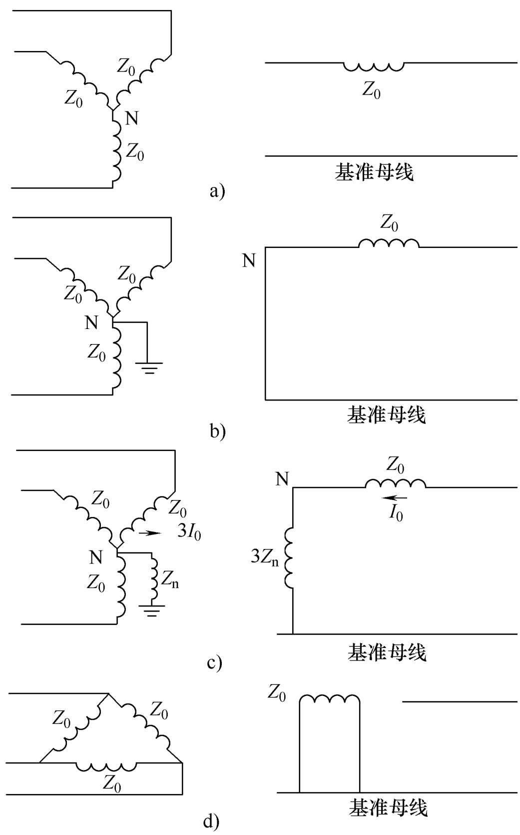


图 8-19　零序等效电路

a）Y联结不接地负荷　b）接地Y联结负荷　c）带接地阻抗的Y联结负荷　d）△联结负荷

在图 8-19c 的接地负荷零序网络中，出现了 3 倍接地阻抗值，因为 $I_n = 3I_0$。最后，图 8-19d 画出的是△联结负荷。这种情况下的零序电流的通道如图所示。

8.8.3　电网

如本章所讨论的，当电网发生与地有关的故障时，就会产生地电流。地电流等于 3 倍零序电流。而且还应该记住，在计算故障电流时，假定除故障部分外电网仍然是平衡的。最后，研究“如果-则”条件来计算故障电流，并把继电保护设置为电网失去平衡之前就断开相关断路器以隔离故障。电网永远设计为三相平衡系统并以这种方式运行。为计算接地故障电流，需要使用零序网络。前述几节介绍了每个电网元件的零序网络。现在需要学习如何构建电网的零序网络以计算不平衡故障电流。

图 8-20 是一个显示电网中变压器联结方式的微电网单线图。从图 8-20 可以看出，连到母线 6 的发电机是一台燃气轮机；它的中性点通过阻抗 Z_G 接地。母线 6 通过一台不接地Y-△联结变压器连到母线 5。

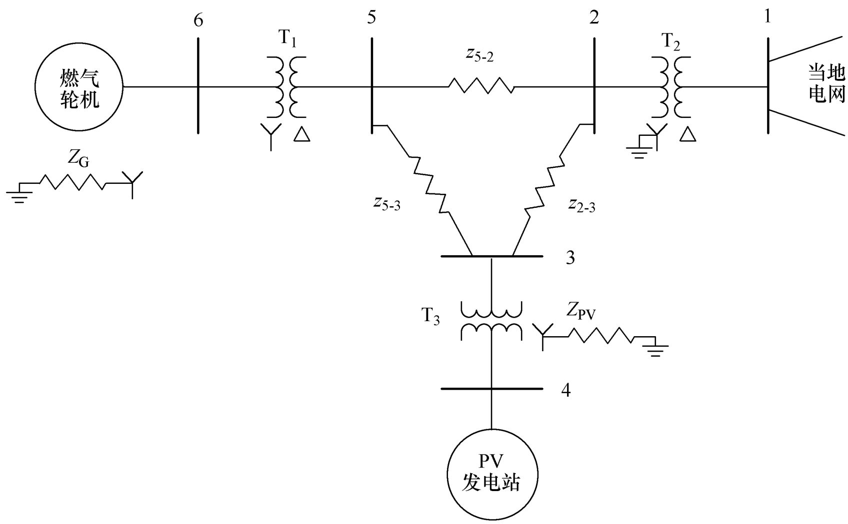


图 8-20　一个平衡三相微电网

图 8-21 画出了图 8-20 的零序网络。图中，燃气轮机用它的零序阻抗 Z_{G0}代替。然而 Z_{G0}要与 3 倍 Z_G 串联，因为流入参考大地的地电流等于 3 倍零序电流。

变压器 T_1 是Y-△联结的，Y侧不接地。因此。该变压器没有通过它的中性点接地，切断了Y-△联结变压器的大地通路。因此，该变压器在图 8-21 的零序网络中显示为开路。

这个三母线电网的输电网络连接到一个 PV 发电站和当地电网。输电系统的零序网络如图 8-21 所示。母线 2 后面的变压器 T_2 连到母线 1，然后接入当地电网。变压器 T_2 是Y-△联结。因为Y-△变压器在Y侧接地，母线 2 通过它的零序阻抗接到参考大地，如图 8-21 所示。

接地Y-△联结变压器 T_3 把母线 3 连到母线 4，再接到 PV 发电站。接地阻抗 Z_{PV} 串联插入变压器Y侧的中性点到大地之间。同样，因为接地Y侧连到母线 4，母线 4 连到参考大地，如图 8-21 所示。然而，母线 3 显示为开路。在变压器 T_2 的△侧，零序电流（地电流）不能流通，图 8-21 的开路显示了这种情况。

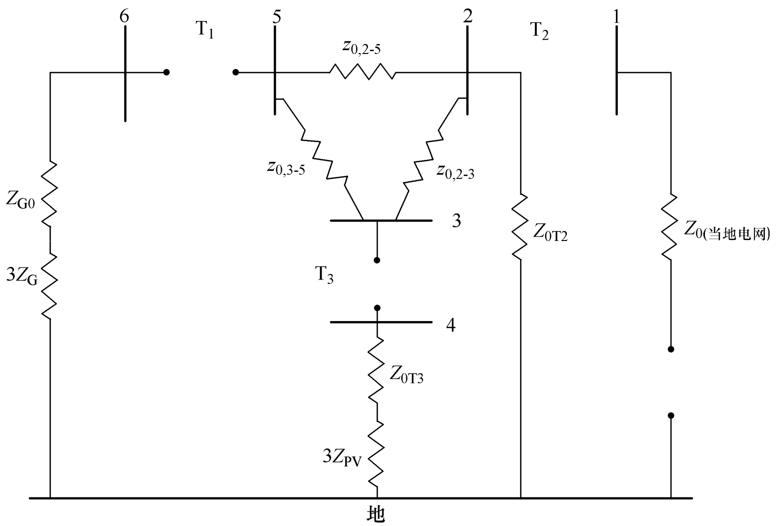


图 8-21 图 8-20 的零序网络

另一种情况是图 8-22 所示的单线图。图 8-23 显示了该图给出的微电网的零序网络。

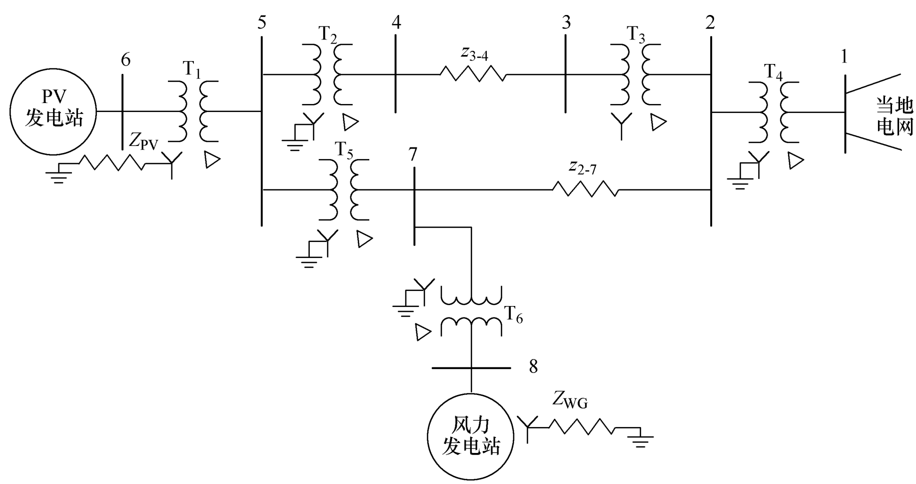


图 8-22 一个平衡的三相风电微电网

为正确创建零序网络，必须仔细观察与大地的连接。此外，还要特别注意变压

器的联结情况。总的看来，变压器不接地会切断地电流通路，如图 8-22 和图 8-23 所示的变压器联结状况。然而，要特别注意Y-Y联结变压器。这种变压器会保持可以从图 8-18b 看到的零序电流通路。

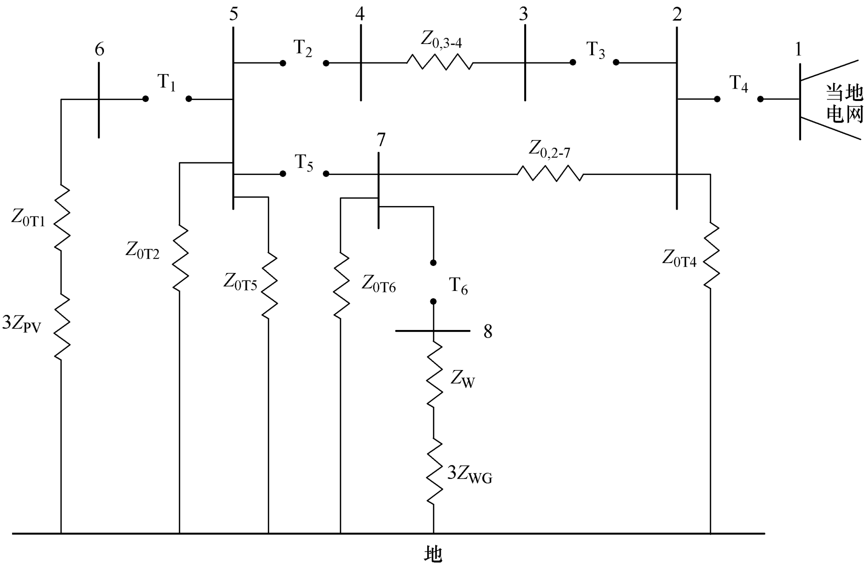


图 8-23　图 8-22 的零序网络

8.9　故障研究

对于平衡三相故障，仅正序网络会被激发。对于不平衡故障，所有 3 种相序网络都会被激发。如果故障涉及接地，则会有地电流产生。发电机电抗产生的反电动势以幅值和相位表示，假定它等于 1pu。

对于故障研究来说，通常包括负荷在内的所有并联元件和线路充电都被忽略。负荷可能以恒定负荷阻抗模型表示。所有抽头接换变压器的抽头都假定位于它的标称设置点，还假定输电线也是平衡的。正序和负序网络假定相同，仅对零序网络才考虑邻近电路之间的耦合。

电网的发电机在暂态电抗下仍保持电压恒定。通常，是否使用 3 种电抗取决于故障清除的速度。发电机的次暂态电抗 X''用发电机试验和发电机电流响应记录来估算。次暂态电抗用第一个 1/4 周波的电流响应斜率来估算。然后，暂态电抗 X'用第一个半周的电流响应斜率估算；而同步电抗 X 用稳态电流估算。各电抗值之间存在以下关系：$X'' < X' < X$。电抗值低会导致短路电流增大。电抗选择是断路器动作时间的函数。如断路器是快速动作的，能切断较大故障电流，则在故障计算中使用较低电抗值。

不平衡故障研究需要使用电网的对称分析法对电网建模。因此，要使用发电

机、变压器、输电线及负荷的相序网络。要根据不平衡故障的类型（单线对地、双线对地及线间故障等）创建电网的对称模型。用这些相序网络模型创建电网的不平衡故障模型。

平衡故障研究的目的是确定所需的断路器短路容量（kVA 或 MVA）。不平衡故障研究的目的是如何设置继电保护系统的定值。必须密切关注故障研究中大型电动机的表示方法。电动机的反电动势会对故障电流有可观贡献。尽管电网中断路器的短路容量（Short-Circuit Capacity，SCC）是根据平衡故障计算的，但在某些系统，单线对地的故障电流可能大于平衡三相故障电流。最后，故障可能发生在系统的任何部分。对于这些情况，会在故障电流计算的“如果-则”条件中把母线放在这个位置。

例 8.2 考虑图 8-24 所示的电网。

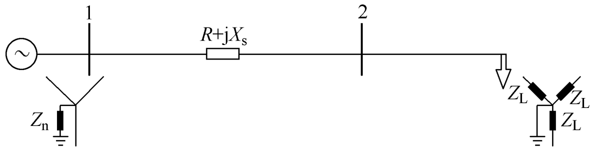


图 8-24 例 8.2 的单线图

假定发电机的正序、负序和零序电抗为 $Z_{gen,1}$、$Z_{gen,2}$ 和 $Z_{gen,0}$，发电机通过接地阻抗 Z_n 接地。另外，假定输电线模型如图 8-25 所示。

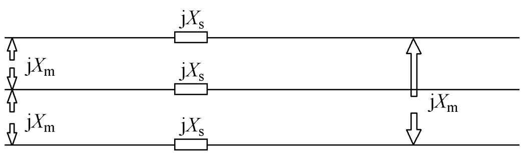


图 8-25 图 8-24 的平衡三相输电线

进行以下计算：

1）如果发电机不平衡运行，提供不平衡三相电压，确定图 8-24 单线图的正序、负序和零序网络。

2）如果发电机平衡运行，提供平衡三相电压，确定图 8-24 单线图的正序、负序和零序网络。

解

1）例 8.2 输电线的负序、正序和零序模型如图 8-26 所示。

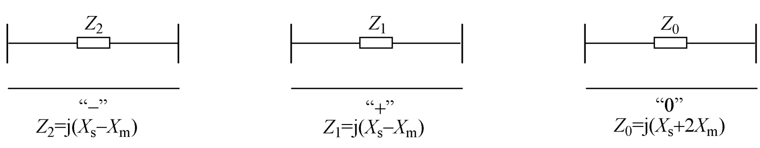


图 8-26 例 8.2 输电线的负序、正序和零序模型

如果输电线总长度为 L，线路分布阻抗和充电导纳如图 8-27a 所示，它的集中参数模型如图 8-27b 所示。其中

$$\begin{aligned} Z_1 &= L \times z \\ Y' &= L \times y \end{aligned} \tag{8-48}$$

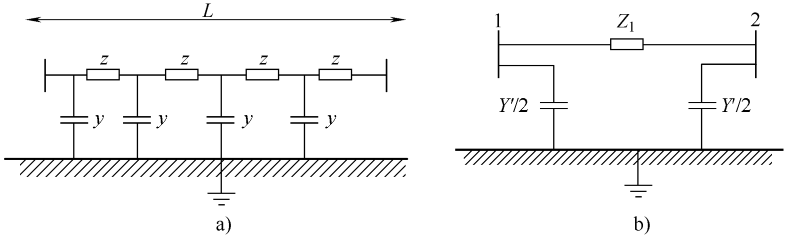


图 8-27

a）输电线分布参数模型 b）输电线集中参数模型

例 8. 2 的零序、正序和负序网络如图 8-28 所示。

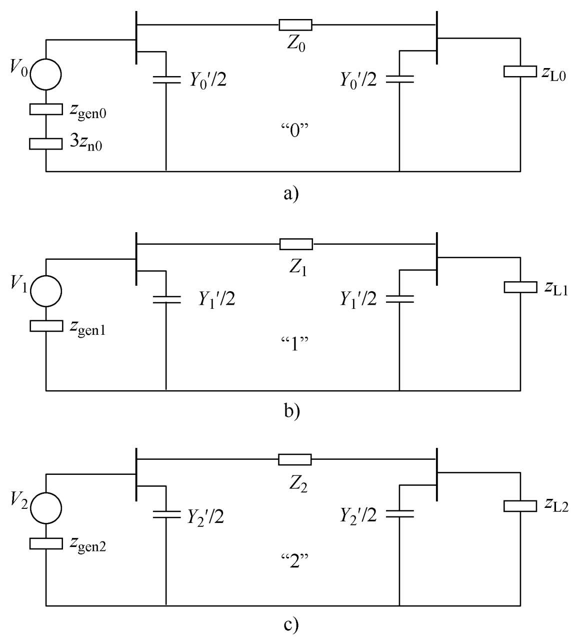


图 8-28 例 8. 2 中，发电机供电电压不平衡时的相序网络

a）零序 b）正序 c）负序

2）如果发电机平衡运行，则它的零序、正序和负序网络如图 8-29 所示。

8. 9. 1 平衡三相故障分析

对于平衡三相故障研究，只需建立正序网络模型。图 8-30 是一个三母线电网的单线图。图 8-31 是平衡故障研究的正序网络模型。

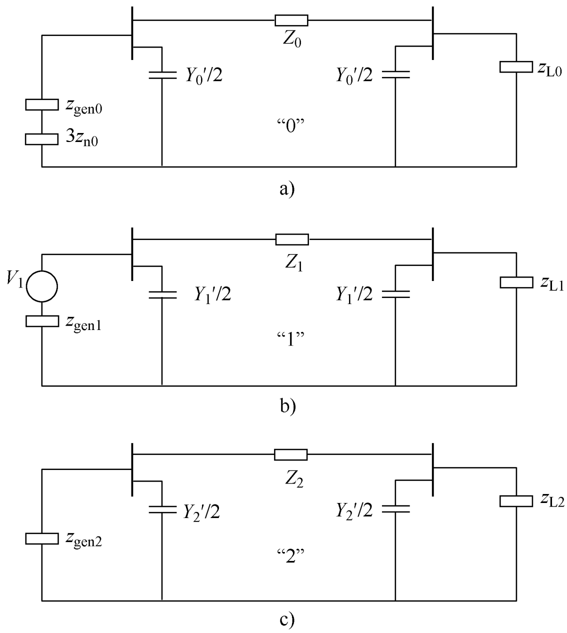


图 8-29　例 8.2 中，发电机供电电压平衡时的相序网络

a）零序　b）正序　c）负序

图 8-31 是包括并联元件和负荷的电力系统完整模型。图中，负荷用等效阻抗表示。

$$z_{\text{load}} = \frac{V_{\text{load}}^2}{P_{\text{load}} - jQ_{\text{load}}} \tag{8-49}$$

删除并联元件和负荷可简化图 8-31 的模型。但这样会得到较大的故障电流。

设计电网时，在计算短路电流之前要进行电压计算和潮流研究。然后用算得的母线负荷电压确定断路器遮断容量。因此，故障前电压要由潮流研究计算，是已知量。

$$\boldsymbol{E}_{\text{Bus}(0)} = \boldsymbol{Z}_{\text{Bus}} \boldsymbol{I}_{\text{Bus}(0)} \tag{8-50}$$

式（8-50）中，$\boldsymbol{E}_{\text{Bus}(0)}$是故障前母线电压矢量，$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$是对于地母线的母线阻抗矩阵模型，$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}(0)}$是故障前发电机注入电流。

故障期间，故障网络变量用“F”标示，故障期间的母线电压可表示为

$$\boldsymbol{E}_{\text{Bus}(\text{F})} = \boldsymbol{E}_{\text{Bus}(0)} - \boldsymbol{Z}_{\text{Bus}(\text{F})} \boldsymbol{I}_{\text{Bus}(\text{F})} \tag{8-51}$$

式中，$\boldsymbol{E}_{\text{Bus}(\text{F})}$是故障期间的母线电压矢量，$\boldsymbol{E}_{\text{Bus}(0)}$是故障前母线电压，$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}(\text{F})}$是母线阻抗矩阵。$\boldsymbol{I}_{\text{Bus}(\text{F})}$是故障期间的母线故障电流。

对于图 8-30 的母线系统，故障发生在母线 3，有

$$\begin{bmatrix} E_{1(\text{F})} \\ E_{2(\text{F})} \\ E_{3(\text{F})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1(0)} \\ E_{2(0)} \\ E_{3(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{3(\text{F})} \end{bmatrix} \tag{8-52}$$

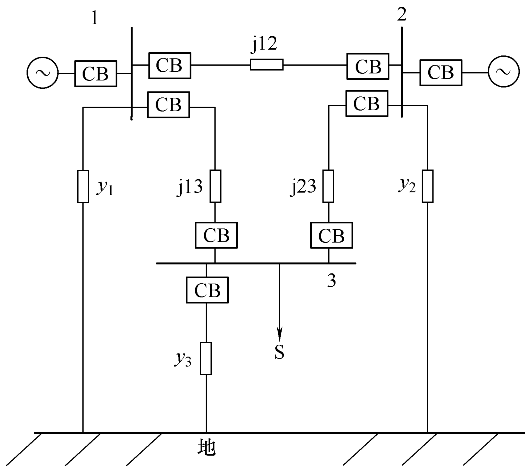


图 8-30　平衡三母线电网的单线图

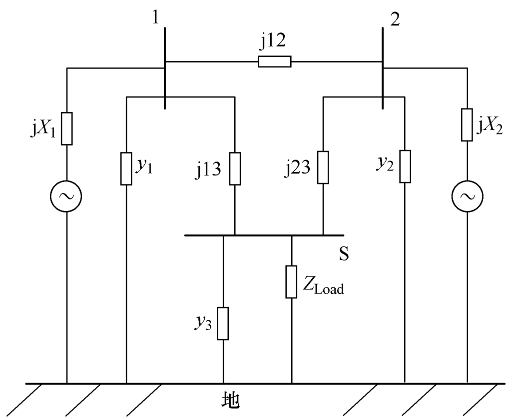


图 8-31　平衡故障研究的正序网络模型

因此，故障期间每条母线的电压可表示为

$$
\begin{aligned}
E_{1(F)} &= E_{1(0)} - Z_{13}I_{3(F)} \\
E_{2(F)} &= E_{2(0)} - Z_{23}I_{3(F)} \\
E_{3(F)} &= E_{3(0)} - Z_{33}I_{3(F)}
\end{aligned}
\tag{8-53}
$$

如果故障阻抗为 Z_f，则故障阻抗两端的电压为

$$E_{3(F)} = Z_f I_{3(F)} \tag{8-54}$$

把式（8-54）带入式（8-53），得

$$Z_f I_{3(F)} = E_{3(0)} - Z_{33}I_{3(F)} \tag{8-55}$$

因此，对于平衡三相故障，母线 3 的故障电流为

$$I_{3(F)} = \frac{E_{3(0)}}{Z_{33} + Z_f} \tag{8-56}$$

式（8-56）中，$E_{3(0)}$是故障前电压，Z_{33}是母线 3 对于地母线的戴维南（Thevenin）阻抗。

一般来说，对于发生在母线 i 的平衡三相故障（见图 8-32），有

$$\begin{bmatrix} E_{1(F)} \\ E_{2(F)} \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{i(F)} \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{n(F)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1(0)} \\ E_{2(0)} \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{i(0)} \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{n(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \cdots\cdots Z_{1i} \cdots\cdots Z_{1n} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} \cdots\cdots Z_{ii} \cdots\cdots Z_{in} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} \cdots\cdots Z_{ni} \cdots\cdots Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{i(F)} \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8-57}$$

由以上所述，母线 i 的故障可表示为

$$E_{i(F)} = E_{i(0)} - Z_{ii} I_{P(F)} \tag{8-58}$$

而且 $E_{i(F)} = Z_f I_{i(F)}$。

因此，母线 i 的故障电流为

$$I_{i(F)} = \frac{E_{i(0)}}{Z_{ii} + Z_f} \tag{8-59}$$

式（8-59）中，$E_{i(0)}$是故障前电压，Z_{ii}是母线 i 对于地母线的戴维南阻抗。

$$\begin{array}{c} \\ \mathbf{Z}_{\text{Bus}} = \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} 1 & & i & & n \end{array} \\ \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 1 \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ n \end{array}$$

正序矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{Bus}}$的元素用正序网络计算。

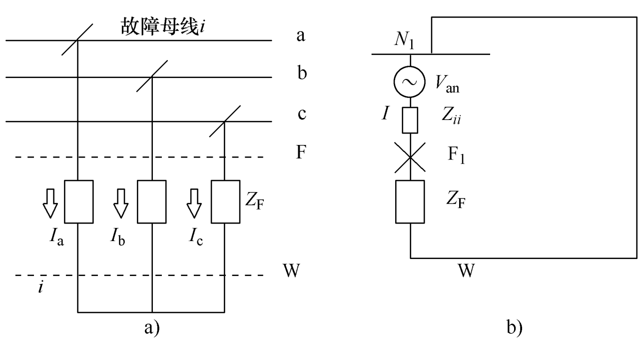


图　8-32

a）平衡三相故障　b）平衡三相故障的戴维南等效电路

计算平衡三相故障的通用算法为

步骤 1：建立正序阻抗网络的矩阵 $\mathbf{Z}_{\mathrm{Bus}}$。

步骤 2：由潮流算得故障前母线电压。

步骤 3：计算 $I_{i(\mathrm{F})}=\dfrac{E_{i(0)}}{Z_{ii}+Z_{\mathrm{f}}}$。

用以上算法可以计算每条母线 i 的平衡故障电流。

连接到母线上的断路器短路容量（SCC）可根据每条母线的平衡三相故障计算。SCC 定义为

$$\mathrm{SCC}=\left|V_{故障前(\mathrm{pu})}\right|\cdot\left|I_{故障(\mathrm{pu})}\right| \tag{8-60}$$

如果故障前电压和故障电流都是标幺值，则 SCC 也是标幺值。要想得到 SCC 的有名值，需要把标幺值乘以 S_{b}。

$$\mathrm{SCC}=S_{\mathrm{b}}\left|V_{故障前(\mathrm{pu})}\right|\cdot\left|I_{故障(\mathrm{pu})}\right| \tag{8-61}$$

$$\mathrm{SCC}=\sqrt{3}\cdot\left|V_{故障前,线间}\right|\cdot\left|I_{故障,线}\right| \tag{8-62}$$

式（8-62）中，电压单位是 V，电流单位是 A。因此，每条母线的故障水平取决于它的对地戴维南阻抗。为清楚解释这一概念，考虑图 8-33 的系统。

图 8-34 画出了计算母线 3 故障电流而给出的戴维南等效电路，其中 V_{th}是故障前母线 3 的电压。

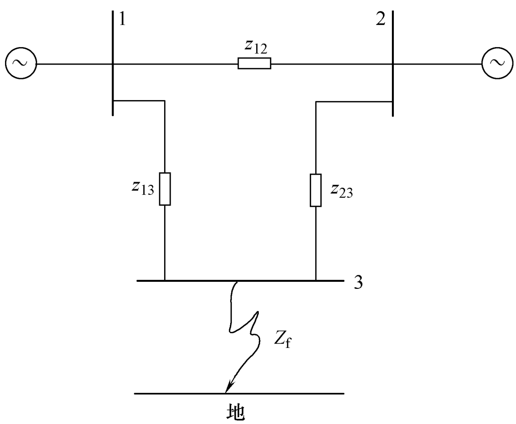


图 8-33　母线 3 发生故障

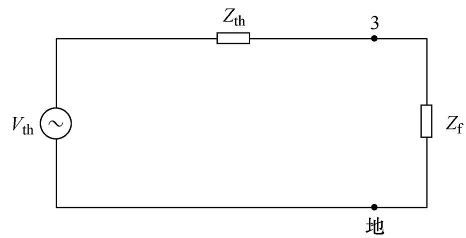


图 8-34　计算母线 3 故障电流的戴维南等效电路

$$I_{\mathrm{f}}=\frac{V_{\mathrm{th}}}{Z_{\mathrm{th}}+Z_{\mathrm{f}}} \tag{8-63}$$

如果故障阻抗为零，则称故障为金属性永久接地故障。这时的式（8-63）可改写为

$$I_{\mathrm{f}}=\frac{V_{\mathrm{th}}}{Z_{\mathrm{th}}} \tag{8-64}$$

电网系统的设计应使每条母线的电压都在 1pu 左右。因此，

$$V_{th} \approx 1\,pu$$

于是，故障电流为

$$I_f = \frac{1}{Z_{th}} \tag{8-65}$$

因此，戴维南阻抗为

$$Z_{th} = \frac{1}{I_f} \tag{8-66}$$

因为 SCC 的标幺值为

$$SCC = |V_{故障前}||I_{故障}|\,pu$$

而且 $V_{故障前} = 1\,pu$，所以

$$SCC = I_{f(故障)}\,pu \tag{8-67}$$

且

$$Z_{th} = \frac{1}{SCC} \tag{8-68}$$

电力公司需要计算它们系统每条母线的 SCC。当绿色能源系统微电网接入当地电网时，需要提供其 SCC，以评估当地电网对微电网的故障电流贡献。因此，SCC 规定了计算微电网断路器遮断容量所需的戴维南输入阻抗。

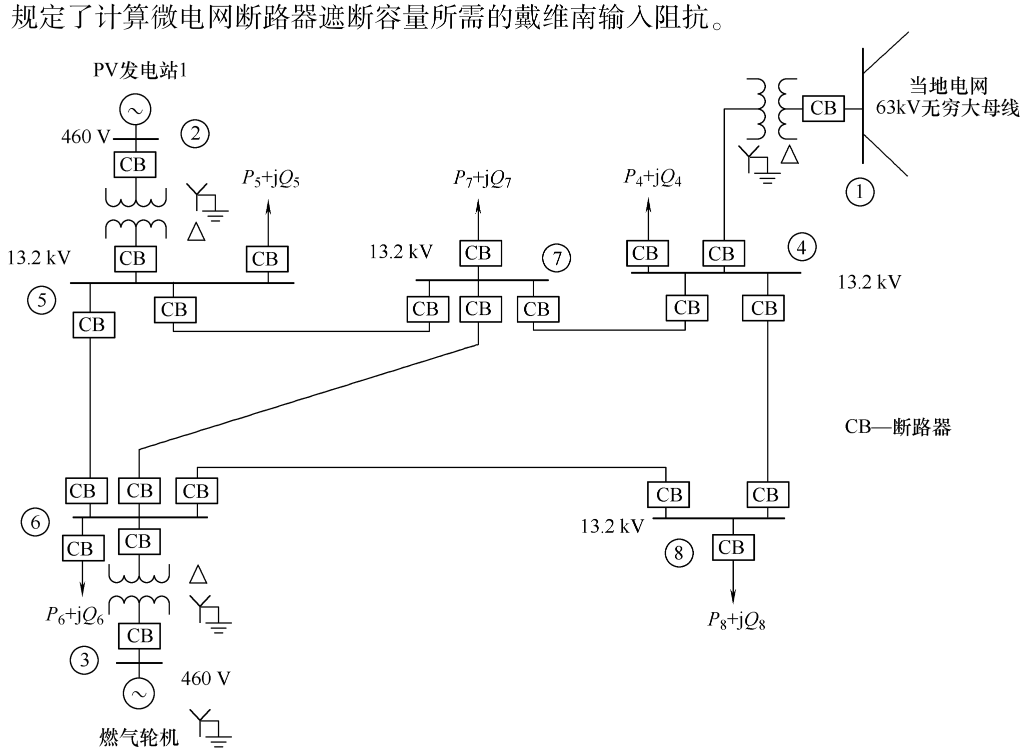


图 8-35 接入当地电网的分布式发电微电网

例 8.3　考虑作为互联电网一部分的一个微电网（见图 8-35）。输电线模型的等效阻抗如图 8-36 所示。假定相关技术参数如下：

当地电网短路容量为 320MVA；

#1PV 发电站：PV 方阵为 2MVA，内阻抗 = 高阻性，额定值的 50%；

燃气轮机：热电联产机组为 10MVA，内电抗为 4%，机组为Y联结，中性点接地；

变压器：低压侧 460V，Y联结，中性点接地；高压侧 13.2kV，△联结，10% 电抗，容量 10MVA；

电网变压器：20MVA，63kV/13.2kV，7% 电抗；

母线 4 负荷为 1.5MW，功率因数为 0.85 滞后；母线 5 负荷为 5.5MW，功率因数为 0.9 滞后；母线 6 负荷为 4.0MW，功率因数为 0.95 超前；母线 7 负荷为 5MW，功率因数为 0.95 滞后；母线 8 负荷为 1.0MW，功率因数为 0.9 滞后；

输电线：电阻为 0.0685Ω/mile，电抗为 0.40Ω/mile，半线路充电导纳（$Y'/2$）= $11\times10^{-6}\Omega^{-1}$/mile。线路 4—7 长度为 5mile，线路 4—8 为 1mile，线路 5—6 为 3mile，线路 5—7 为 2mile，线路 6—7 为 2mile，线路 6—8 为 4mile。

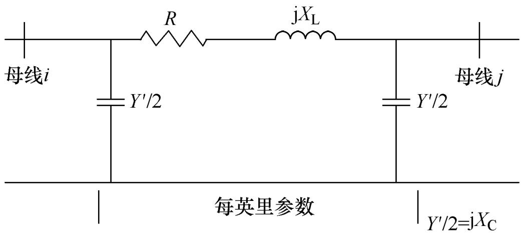


图 8-36　例 8.3 输电线模型的等效阻抗

进行以下计算：

1）建立以 20MVA 为基值的平衡三相故障研究的标幺值等效模型。

2）如果母线负荷电压为 1pu，计算每个负荷的标幺值等效模型。

3）计算每条配电网络母线的三相故障 SCC。

4）为提高系统安全性，每个配电网络和与当地电网的互联都使用两台同样的变压器。计算每条母线的 SCC。

解

1）容量基值选为 S_b = 20MVA。PV 发电站和燃气轮机侧的电压基值选为 460V。因此，输电线侧电压基值为 V_b = 13.2kV。

当地电网的 SCC 标幺值为

$$\frac{SCC}{S_b}=\frac{320}{20}=16$$

因此，当地电网的内阻抗标幺值为

$$Z_{th}=\mathrm{j}\frac{1}{SCC_{pu}}=\mathrm{j}\frac{1}{16}=\mathrm{j}0.063$$

以 20MVA 为基值，PV 发电站内阻抗标幺值为

$$Z_{pu(new)}=Z_{pu(old)}\times\frac{VA_{b(new)}}{VA_{b(old)}}\times\left(\frac{V_{b(old)}}{V_{b(new)}}\right)^2$$

$$=0.5\times\frac{20\times10^6}{2\times10^6}\times\left(\frac{460}{460}\right)^2=5$$

燃气轮机阻抗标幺值为

$$z=\mathrm{j}0.4\times\frac{20\times10^6}{10\times10^6}\times\left(\frac{460}{460}\right)^2=\mathrm{j}0.8$$

输电系统阻抗基值为

$$Z_b=\frac{V_b^2}{S_b}=\frac{(13.2\times10^3)^2}{20\times10^6}\Omega=8.712\Omega$$

导纳基值为

$$Y_b=\frac{1}{Z_b}=\frac{1}{8.712}=0.115$$

当地电网变压器的标幺值阻抗为 7%，以 20MVA 为基值。

短路研究的阻抗模型如图 8-37 所示。每条母线的负荷和它的等效负荷电抗见表 8-1。

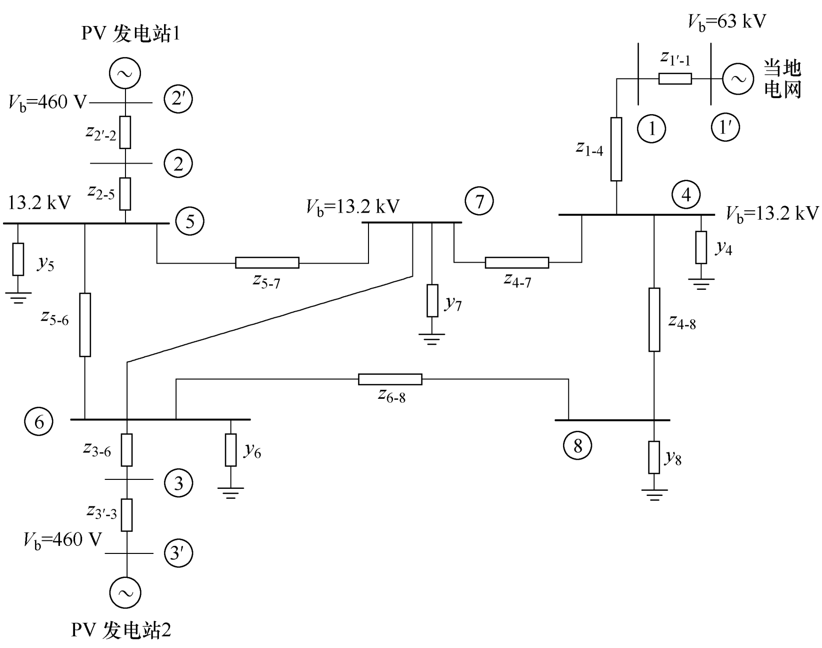


图 8-37　短路研究的阻抗模型

表 8-1　每条母线的负荷和它的等效负荷电抗

母线编号	负　　荷	复功率（pu）	等效负荷阻抗（pu）
4	1.5MW，功率因数为 0.85 滞后 =1.5 + j0.92	0.075 + j0.046	9.69 + j5.94
5	5.5MW，功率因数为 0.9 滞后 =5.5 + j2.66	0.275 + j0.133	2.95 + j1.43
6	4.0MW，功率因数为 0.95 超前 =4.0 − j1.31	0.20 − j0.066	4.51 − j1.49
7	5MW，功率因数为 0.95 滞后 =5 + j1.64	0.25 + j0.082	3.61 + j1.18
8	1.0MW，功率因数为 0.9 滞后 =1.0 + j0.48	0.05 + j0.024	16.25 + j7.80

2）用它们的等效阻抗表示的负荷用下式计算：

$$z_{\text{load}} = \frac{V_{\text{load}}^2}{P_{\text{load}} - \text{j}Q_{\text{load}}}$$

3）母线 i、j 之间的标幺值阻抗为

$$z_{i-j,\text{pu}} = \frac{z_{i-j}}{Z_{\text{b}}}$$

用上述公式计算的输电线标幺值参数列于表 8-2。

表 8-2（a）　**变压器标幺值阻抗**

变压器位置	串联阻抗（pu）
1—4	j0.07
2—5	j0.2
3—6	j0.2

表 8-2（b）　**输电线参数**

线路	串联阻抗（pu）	线路充电导纳（pu）
4—7	0.039 + j0.229	$\text{j}479 \times 10^{-6}$
4—8	0.008 + j0.046	$\text{j}96 \times 10^{-6}$
5—6	0.024 + j0.138	$\text{j}287 \times 10^{-6}$
5—7	0.016 + j0.092	$\text{j}192 \times 10^{-6}$
6—7	0.016 + j0.092	$\text{j}192 \times 10^{-6}$
6—8	0.031 + j0.184	$\text{j}383 \times 10^{-6}$

母线导纳矩阵用式（7-18）给出的 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 算法计算。对于短路研究，计算每条母线的平衡故障电流时，行业的实际做法是忽略线路充电和负荷阻抗。然而也可以把负荷阻抗包括在内，方法是使用潮流计算时得到的母线负荷电压。

$$z_{\text{load}}=\frac{V_{\text{load}}}{I_{\text{load}}}=\frac{V_{\text{load}}}{(V_{\text{load}}/I_{\text{load}})^{*}}=\frac{V_{\text{load}}^{2}}{S_{\text{load}}^{*}}$$

然而，因为在已经设计好的电网中，负荷母线电压大约为 1pu，误差为 5%，所以可以使用 1pu 作为负荷电压来计算短路研究中使用的负荷阻抗。

短路研究中的矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 要包括发电机母线的内阻抗。对于例 8.3，$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 是 8×8 阶矩阵，其电压源用它们的内阻抗代替来求戴维南等效阻抗。

$$\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}=\begin{array}{c}\begin{matrix}1&2&3&4&5&6&7&8\end{matrix}\\ \begin{bmatrix}-\text{j}30.2&0&0&\text{j}14.3&0&0&0&0\\0&0.2-\text{j}5&0&0&\text{j}5.0&0&0&0\\0&0&-\text{j}6.25&0&0&\text{j}5.0&0&0\\\text{j}14.3&0&0&4.35-\text{j}39.68&0&0&-0.72+\text{j}4.23&-3.6+\text{j}21.16\\0&\text{j}5.0&0&0&3.02-\text{j}22.63&-1.2+\text{j}7.1&-1.8+\text{j}10.58&0\\0&0&\text{j}5.0&0&-1.2+\text{j}7.1&3.93-\text{j}27.92&-1.8+\text{j}10.58&-0.91+\text{j}5.29\\0&0&0&-0.7+\text{j}4.2&-1.8+\text{j}10.6&-1.8+\text{j}10.58&4.35-\text{j}25.39&0\\0&0&0&-3.6+\text{j}21.2&0&-0.9+\text{j}5.29&0&4.53-\text{j}26.45\end{bmatrix}\end{array}\begin{matrix}1\\2\\3\\4\\5\\6\\7\\8\end{matrix}$$

母线导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\text{Bus}}$ 的逆是矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$。矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$ 的对角线元素是母线向系统看去的戴维南等效阻抗。即 Z_{ii} 是母线 i 对地的戴维南阻抗。

$$\text{SCC}_{\text{pu}}=\frac{1}{Z_{ii}}\qquad i=1,2,\cdots,8$$

式中，Z_{ii} 是 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}$ 的对角线元素。每条母线的 SCC 见表 8-3。

表 8-3　每条母线的断路器短路容量（SCC）

母线编号	SCC（pu）
1	16.71
2	2.21
3	3.42
4	8.41
5	3.92
6	4.82
7	4.57
8	6.45

4）如果每条发电机母线都使用两台变压器，则每条母线的 SCC 见表 8-4。

从表 8-3 和表 8-4 的数据可见，两台变压器并联使用会降低每条母线的戴维南阻抗，提高短路电流。因此，在电网出现变化时，必须进行电网短路研究，以确保不超过断路器的 SCC。

表 8-4　带两台变压器时每条母线的断路器短路容量（SCC）

母线编号	SCC（pu）
1	16.81
2	3.05
3	4.31
4	11.18
5	4.36
6	5.51
7	5.20
8	7.91

例 8.4　考虑下面图 8-38 给出的电网。

假定容量基值为 100MVA，进行以下计算：

1）所有变压器和发电机 G_1 都投运时，母线 5（415V）的 SCC。

2）所有变压器都投运，但发电机 G_1 不投运时，母线 5（415V）的 SCC。

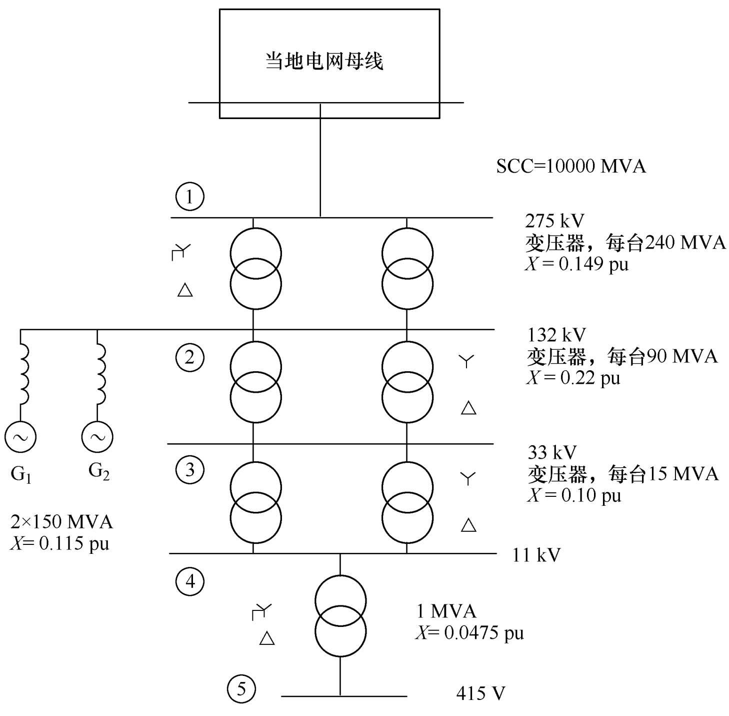


图 8-38　例 8.4 的单线图

解

容量基值为 $S_b=100\text{MVA}$。

当地电网母线 SCC = 10000MVA。

因此，它的 SCC 标幺值为

$$\text{SSC}_{\text{pu}}=\frac{\text{SSC}}{S_b}$$

$$\text{SSC}_{\text{pu}}=\frac{10000}{100}=100\text{pu}$$

由式（8-68），电网内阻抗为

$$X_{\text{th}}=\frac{1}{100}=0.01\text{pu}$$

新基值下变压器和发电机的标幺值阻抗为

$$Z_{\text{pu(new)}}=Z_{\text{pu(old)}}\times\frac{VA_{\text{b(new)}}}{VA_{\text{b(old)}}}\times\left(\frac{V_{\text{b(old)}}}{V_{\text{b(new)}}}\right)^2$$

因此，以 100MVA 为基值的变压器和发电机标幺值阻抗如下：

对于 240MVA 变压器，$X_{\text{Tr240}}=0.149\times\frac{100}{240}=0.062\text{pu}$

对于 90MVA 变压器，$X_{\text{Tr90}}=0.22\times\frac{100}{99}=0.244\text{pu}$

对于 15MVA 变压器，$X_{\text{Tr15}}=0.1\times\frac{100}{15}=0.67\text{pu}$

对于 1MVA 变压器，$X_{\text{Tr1}}=0.0475\times\frac{100}{1}=4.75\text{pu}$

对于发电机 G_1 和 G_2，$X_G=0.115\times\frac{100}{150}=0.0766\text{pu}$

1）所有发电机和变压器都投运时的故障分析等效电路如图 8-39 所示。

图 8-39a 是图 8-38 在故障条件下的等效电路。它的并联阻抗再简化为图 8-39b 中的单一阻抗；图 8-39c 中，串联阻抗被合并到一起，构成了只有 3 个等效阻抗的电路。图 8-39d 是最终的简化等效电路。

由式（8-68），故障电流标幺值为

$$I_f=\frac{1}{Z_{\text{th}}}$$

$$=\frac{1}{\text{j}5.227}=0.1913\text{pu}$$

应该指出，在 1pu 电压下，故障电流标幺值和 SCC 标幺值是相等的。

$$\text{SCC}=\text{SCC}_{\text{pu}}\times S_b$$

$$\text{SCC}=0.1913\times100\text{MVA}=19.13\text{MVA}$$

由下面的矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{Bus}}^{+}$ 可求得母线 5 的戴维南阻抗，用它可计算母线 5 的故障电流。

$$\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}^{+}=\begin{bmatrix} \text{j}0.009 & \text{j}0.005 & \text{j}0.005 & \text{j}0.005 & \text{j}0.005 \\ \text{j}0.005 & \text{j}0.020 & \text{j}0.020 & \text{j}0.020 & \text{j}0.020 \\ \text{j}0.005 & \text{j}0.020 & \text{j}0.142 & \text{j}0.142 & \text{j}0.142 \\ \text{j}0.005 & \text{j}0.020 & \text{j}0.142 & \text{j}0.477 & \text{j}0.477 \\ \text{j}0.005 & \text{j}0.020 & \text{j}0.142 & \text{j}0.477 & \text{j}5.227 \end{bmatrix}$$

母线 5 的正序戴维南阻抗是 $\boldsymbol{Z}_{\text{Th},5}^{+}=\boldsymbol{Z}_{55}^{+}=\text{j}5.227$。

这个从 $\boldsymbol{Z}_{\text{Bus}}^{+}$得到的值与从图 8-39 的电路简化得到的值完全相同。故障电流的

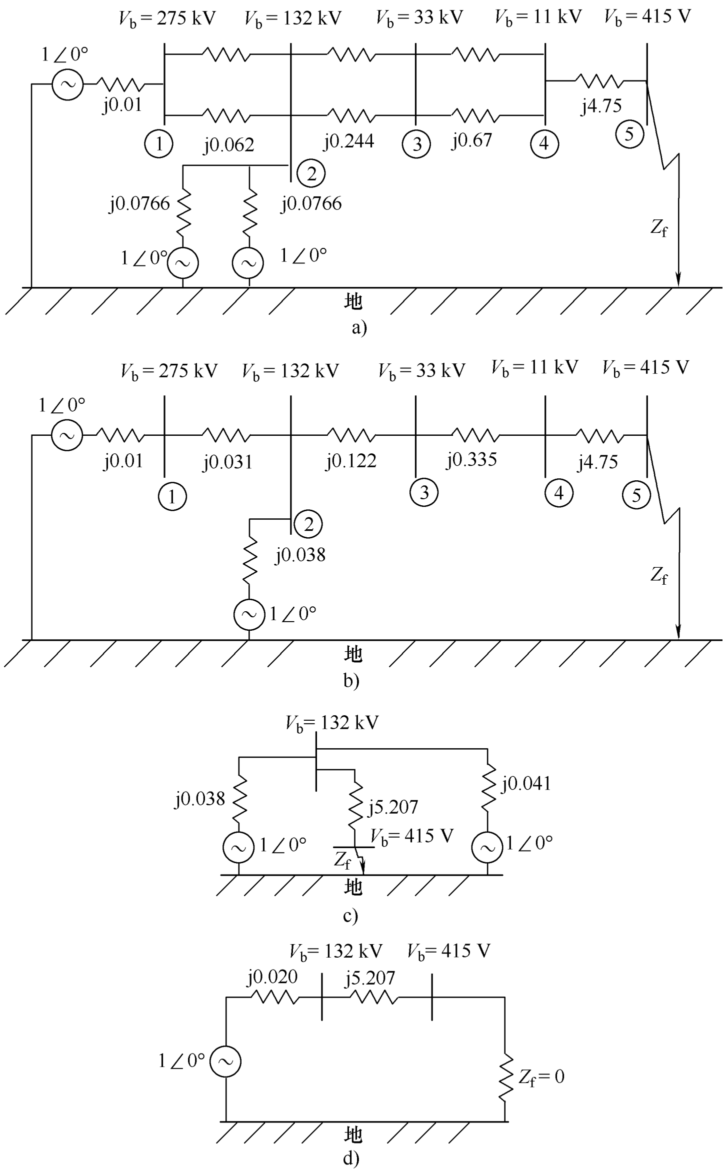


图 8-39　例 8.4 的电路阻抗图

计算过程如前面所示。

2）发电机 G_1 停运情况下的故障分析等效电路如图 8-40 所示。

图 8-40a 的故障网络简化示于图 8-40b ~ d，步骤与第 1）部分的说明相同。

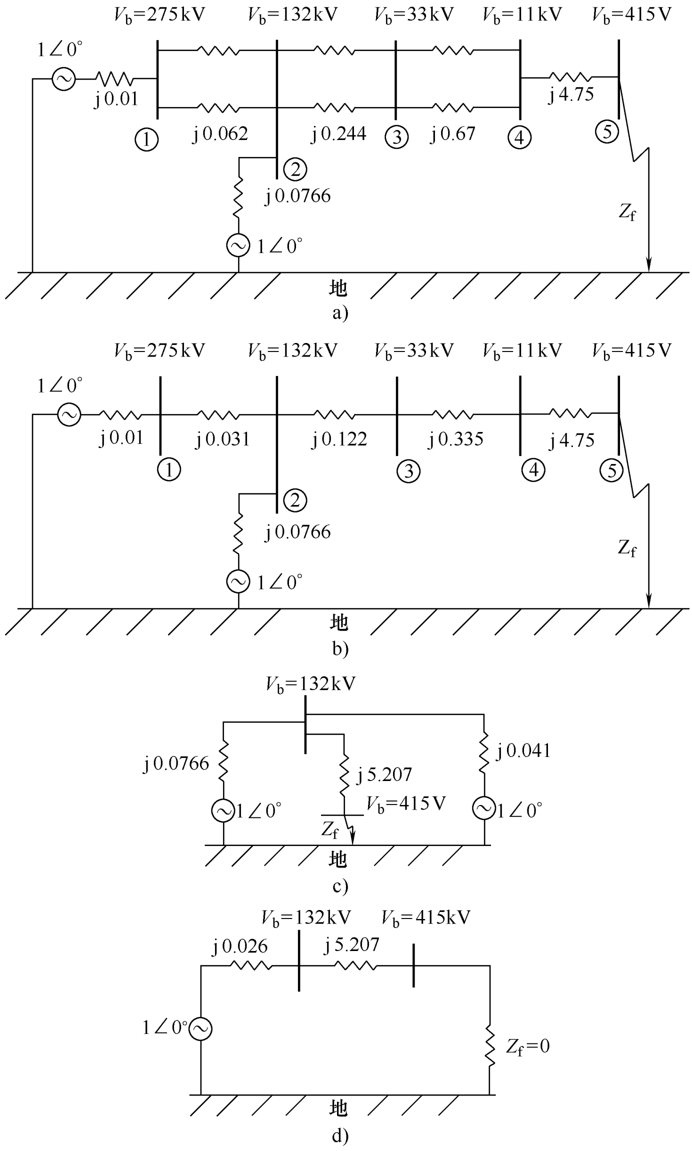


图 8-40　例 8.4 第 2）部分的电路阻抗图

由式（8-68），故障电流标幺值为

$$I_f = \frac{1}{Z_{th}}$$

$$Z_{\text{th}}=\frac{1}{\text{j}5.233}=0.1911\text{pu}$$

在 1pu 电压下，故障电流标幺值和 SCC 标幺值相等。

$$\text{SCC}=\text{SCC}_{\text{pu}}\times S_{\text{b}}$$

$$\text{SCC}=0.1911\times 100\text{MVA}=19.11\text{MVA}$$

由下面的矩阵 $\boldsymbol{Z}^{+}_{\text{Bus}}$ 可求得母线 5 的戴维南阻抗，用它可计算母线 5 的故障电流。

$$\boldsymbol{Z}^{+}_{\text{Bus}}=\begin{bmatrix}\text{j}0.009 & \text{j}0.007 & \text{j}0.007 & \text{j}0.007 & \text{j}0.007\\ \text{j}0.007 & \text{j}0.027 & \text{j}0.027 & \text{j}0.027 & \text{j}0.027\\ \text{j}0.007 & \text{j}0.027 & \text{j}0.149 & \text{j}0.149 & \text{j}0.149\\ \text{j}0.007 & \text{j}0.027 & \text{j}0.149 & \text{j}0.484 & \text{j}0.484\\ \text{j}0.007 & \text{j}0.027 & \text{j}0.149 & \text{j}0.484 & \text{j}5.233\end{bmatrix}$$

母线 5 的正序戴维南阻抗是 $\boldsymbol{Z}^{+}_{\text{Th},5}=\boldsymbol{Z}^{+}_{55}=\text{j}5.233$。

这个从 $\boldsymbol{Z}^{+}_{\text{Bus}}$ 得到的值与从前面的电路简化得到的值完全相同。故障电流的计算过程如前面所示。

8.9.2　不平衡故障

根据不同故障类型，需要使用正序、负序和零序网络。故障涉及接地时，如果存在地电流流动的低阻抗路径，就会有地电流流过部分网络。不平衡故障电流用于设置继电保护系统。最常见的故障是单线对地故障。出于安全和电网保护考虑，需要设计接地网。在检测出地电流时，继电保护系统要辨识故障类型，并通过开断相应断路器来隔离系统的故障部分。

电网被设计为运行于平衡三相系统。正如前面所讨论的，在不平衡故障分析中，系统唯一不平衡的部分是故障部分。例如，三相线路的一根导线因风暴经过发生了故障，故障导线会被迅速切除，使电网在故障过程中仍然保持平衡。

8.9.3　单线对地故障

为分析单线对地故障，假定电网输电线路的一根相线被大风吹断并落到树上，其接地阻抗为 Z_{f}。这是一种典型的单线对地故障情况。通常习惯把故障相定为 a 相。假定故障点为母线 i。因为 b 相和 c 相是健全的，所以在母线 i，以下条件成立：

$$I_{\text{fb}}=0,\ I_{\text{fc}}=0,\ \text{且}\ V_{\text{fa}}=Z_{\text{f}}\cdot I_{\text{fa}}$$

式中，Z_{f} 是母线 i 处 a 相对地故障阻抗。

再回想一下相电流 a、b、c 到零序、正序、负序电流的对称变换。

$$\begin{bmatrix}I^{0}_{\text{fa}}\\ I^{+}_{\text{fa}}\\ I^{-}_{\text{fa}}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^{2}\\ 1 & a^{2} & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_{\text{fa}}\\ I_{\text{fb}}\\ I_{\text{fc}}\end{bmatrix}\tag{8-69}$$

把单线对地故障的条件带入，得

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^0 \\ I_{fa}^+ \\ I_{fa}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8-70}$$

上述矩阵可简化为

$$I_{fa}^0 = I_{fa}^+ = I_{fa}^- \tag{8.71}$$

上述公式清楚表明，在计算单线对地故障时，零序、正序和负序网络必须串联。

还应该记得，我们关注母线 i 的“如果-则”条件。即母线 i 故障前的戴维南电压就是它的开路电压。故障前，电网是平衡的，而且在故障期间假定它仍保持同样电压，因为故障被非常迅速地隔离。母线 i 的阻抗是戴维南阻抗。因此需要通过考察母线 i 的零序、正序和负序网络来计算戴维南阻抗。图 8-41b 画出了单线对地的相序网络接线。

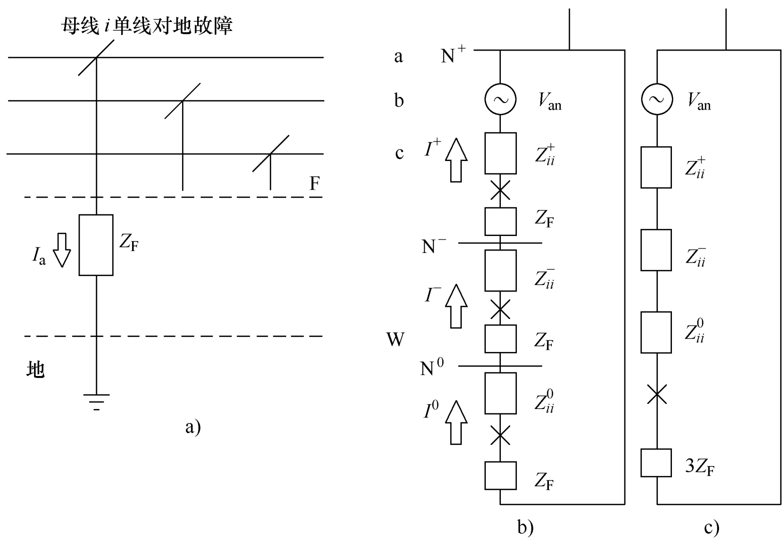


图 8-41

a）单线对地故障 b）单线对地故障计算的相序网络

c）单线对地故障计算的简化相序网络接线

为计算单线对地故障，要建立电网的正序、负序、零序网络，然后用下面的式（8-72）~式（8-74）计算 $\mathbf{Z}_{\mathrm{Bus}}^+$、$\mathbf{Z}_{\mathrm{Bus}}^-$和 $\mathbf{Z}_{\mathrm{Bus}}^0$。

$$\mathbf{Z}_{\text{Bus}}^{+}=\begin{bmatrix} Z_{11}^{+} & \cdots & Z_{1i}^{+} & \cdots & Z_{1n}^{+} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{+} & \cdots & Z_{ii}^{+} & \cdots & Z_{in}^{+} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{+} & \cdots & Z_{ni}^{+} & \cdots & Z_{nn}^{+} \end{bmatrix}\begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ n \end{matrix} \tag{8-72}$$

（列标：1　i　n）

$$\mathbf{Z}_{\text{Bus}}^{-}=\begin{bmatrix} Z_{11}^{-} & \cdots & Z_{1i}^{-} & \cdots & Z_{1n}^{-} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{-} & \cdots & Z_{ii}^{-} & \cdots & Z_{in}^{-} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{-} & \cdots & Z_{ni}^{-} & \cdots & Z_{nn}^{-} \end{bmatrix}\begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ n \end{matrix} \tag{8-73}$$

（列标：1　i　n）

$$\mathbf{Z}_{\text{Bus}}^{0}=\begin{bmatrix} Z_{11}^{0} & \cdots & Z_{1i}^{0} & \cdots & Z_{1n}^{0} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{0} & \cdots & Z_{ii}^{0} & \cdots & Z_{in}^{0} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{0} & \cdots & Z_{ni}^{0} & \cdots & Z_{nn}^{0} \end{bmatrix}\begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ n \end{matrix} \tag{8-74}$$

（列标：1　i　n）

对于故障母线，其输入阻抗（即戴维南阻抗）要从相应的正序、负序和零序网络的对角线元素选择。对于单线对地故障，正序、负序和零序网络的戴维南阻抗必须如图 8-41b 那样串联。故障前正序电压与故障后相同，它激发流过故障网络的电流。

8.9.4　双线对地故障

在典型的双线对地故障中，可以想象以下情况。假定一相导线的绝缘破损，并落到另一根相线上，然后又落到树上。因为树是接地的，所以有两根导线发生了意外连接，这样就形成了双线接地故障条件。图 8-42a 画出的就是双线接地故障。

习惯上把故障相定为 b 相和 c 相，如图 8-42a 所示。故障条件表明，a 相没有故障，所以 $I_{\text{fa}}=0$。可以用对称变换法计算故障期间的相序电流。

$$\begin{bmatrix} I_{\text{fa}}^{0} \\ I_{\text{fa}}^{+} \\ I_{\text{fa}}^{-} \end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^{2} \\ 1 & a^{2} & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ I_{\text{fb}} \\ I_{\text{fc}} \end{bmatrix} \tag{8-75}$$

因此。零序电流为

$$I_{\text{fb}}+I_{\text{fc}}=3I_{\text{fa}}^{0} \tag{8-76}$$

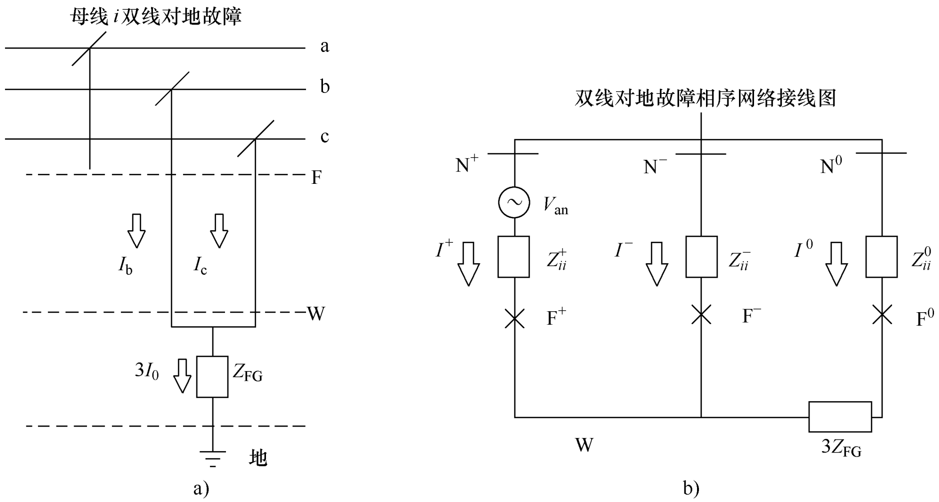


图 8-42

a）双线接地故障 b）双线接地故障的相序网络连接

因为电网是平衡的，而且母线 i 处的 a、b、c 相电压仍保持平衡，所以

$$V_{fb}=V_{fc}=(I_{fb}+I_{fc})Z_{FG} \tag{8-77}$$

把 b、c 相电流 $I_{fb}+I_{fc}=3I_{fa}^0$ 带入，得

$$V_{fb}=V_{fc}=3Z_{FG}\cdot I_{fa}^0$$

上述分析清楚表明，要计算双线对地故障，必须使用图 8-42b 给出的相序网络连线。

与单线对地故障一样，这种故障也涉及接地，要计算双线对地故障电流，需要知道故障点的戴维南阻抗和故障前的戴维南电压。因此需要建立用下面式（8-78）~式(8-80）给出的电网正序、负序、零序阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{Bus}^+$、$\mathbf{Z}_{Bus}^-$ 和 $\mathbf{Z}_{Bus}^0$。

$$\begin{matrix} & 1 & & i & & n & \\ \mathbf{Z}_{Bus}^+ = & \begin{bmatrix} Z_{11}^+ & \cdots & Z_{1i}^+ & \cdots & Z_{1n}^+ \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^+ & \cdots & Z_{ii}^+ & \cdots & Z_{in}^+ \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^+ & \cdots & Z_{ni}^+ & \cdots & Z_{nn}^+ \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ i, \\ \cdot \\ n \end{matrix} \end{matrix} \tag{8-78}$$

$$\begin{matrix} & 1 & & i & & n & \\ \mathbf{Z}_{Bus}^- = & \begin{bmatrix} Z_{11}^- & \cdots & Z_{1i}^- & \cdots & Z_{1n}^- \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^- & \cdots & Z_{ii}^- & \cdots & Z_{in}^- \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^- & \cdots & Z_{ni}^- & \cdots & Z_{nn}^- \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ i, \\ \cdot \\ n \end{matrix} \end{matrix} \tag{8-79}$$

$$
Z_{\text{Bus}}^{0}=\begin{array}{c}\begin{matrix}1 & & i & & n\end{matrix}\\ \begin{bmatrix} Z_{11}^{0} & \cdots & Z_{1i}^{0} & \cdots & Z_{1n}^{0}\\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{0} & \cdots & Z_{ii}^{0} & \cdots & Z_{in}^{0}\\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{0} & \cdots & Z_{ni}^{0} & \cdots & Z_{nn}^{0}\end{bmatrix}\end{array}\begin{matrix}1\\ \cdot \\ i\\ \cdot \\ n\end{matrix} \tag{8-80}
$$

这些母线矩阵 **Z** 的对角线元素代表相应的戴维南阻抗。

8.9.5　线间故障

图 8-43a 画出的是线间故障。这类故障可能发生在大风导致绝缘失效，一根相线落到另一根相线的时候。人们习惯上把故障相定为 b 相和 c 相。因此，对于故障点，存在以下关系

$$I_{\text{fa}}=0,I_{\text{fc}}=-I_{\text{fb}} \tag{8-81}$$

故障前和故障后的电网都是平衡的，因为故障通过开断相应的断路器被极迅速切除。

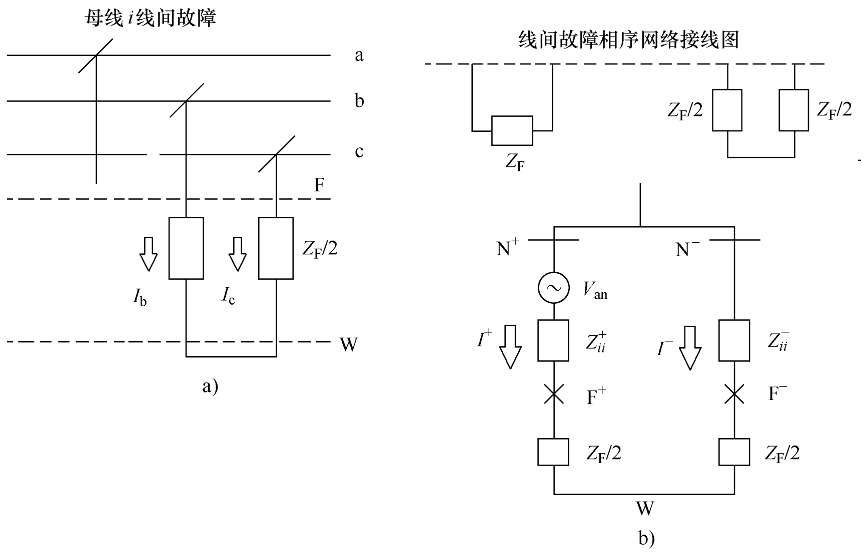


图　8-43

a）线间故障　b）线间故障的相序网络接线图

$$V_{\text{fb}}-V_{\text{fc}}=I_{\text{fb}}\cdot Z_{\text{f}} \tag{8-82}$$

$$
\begin{bmatrix} I_{\text{fa}}^{0}\\ I_{\text{fa}}^{+}\\ I_{\text{fa}}^{-}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^{2}\\ 1 & a^{2} & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ I_{\text{fb}}\\ -I_{\text{fb}}\end{bmatrix} \tag{8-83}
$$

由以上可得，

$$I_{fa}^{0}=0 \tag{8-84}$$

$$I_{fa}^{+}=-I_{fa}^{-} \tag{8-85}$$

上述结果清楚表明，我们需要使用图 8-43b 所示的相序网络接线图来计算线间故障。

为计算故障母线的戴维南阻抗，需要构建正序和负序阻抗矩阵，即式（8-86）和式（8-87）的 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{+}$ 和 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{-}$。母线矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的对角线元素等于戴维南阻抗。戴维南电压等于故障母线在故障前的电压。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{+}=\begin{matrix} & \begin{matrix}1 & & i & & n\end{matrix} & \\ & \begin{bmatrix} Z_{11}^{+} & \cdots & Z_{1i}^{+} & \cdots & Z_{1n}^{+} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{+} & \cdots & Z_{ii}^{+} & \cdots & Z_{in}^{+} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{+} & \cdots & Z_{ni}^{+} & \cdots & Z_{nn}^{+} \end{bmatrix} & \begin{matrix}1\\ \cdot\\ i\\ \cdot\\ n\end{matrix}\end{matrix} \tag{8-86}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{-}=\begin{matrix} & \begin{matrix}1 & & i & & n\end{matrix} & \\ & \begin{bmatrix} Z_{11}^{-} & \cdots & Z_{1i}^{-} & \cdots & Z_{1n}^{-} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{i1}^{-} & \cdots & Z_{ii}^{-} & \cdots & Z_{in}^{-} \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ Z_{n1}^{-} & \cdots & Z_{ni}^{-} & \cdots & Z_{nn}^{-} \end{bmatrix} & \begin{matrix}1\\ \cdot\\ i\\ \cdot\\ n\end{matrix}\end{matrix} \tag{8-87}$$

例 8.5 考虑图 8-44 和图 8-45 给出的电力系统。

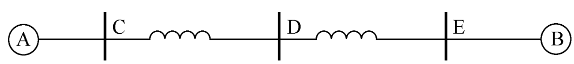


图 8-44 例 8.5 的单线图

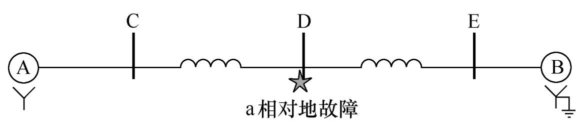


图 8-45 母线 D 单线对地故障的三相示意图

系统数据以标幺值给出，容量基值为 100MVA。

发电机 A：$X_{G}^{+}=0.25\text{pu}$，$X_{G}^{-}=0.15\text{pu}$，$X_{G}^{0}=0.03\text{pu}$

发电机 B：$X_{G}^{+}=0.2\text{pu}$，$X_{G}^{-}=0.12\text{pu}$，$X_{G}^{0}=0.02\text{pu}$

输电线 C—D：$Z^{+}=Z^{-}=\text{j}0.08\text{pu}$，$Z^{0}=\text{j}0.14\text{pu}$

输电线 D—E：$Z^{+}=Z^{-}=\text{j}0.06\text{pu}$，$Z^{0}=\text{j}0.12\text{pu}$

进行以下计算：

假定发电机 A 为Y联结且不接地，发电机 B 为Y联结但接地。计算母线 D 单线对地故障。确定它的相序网络，并显示系统故障母线 D 的线对地电流。

解

母线 D 发生单线对地故障的等效电路如图 8-46 所示。

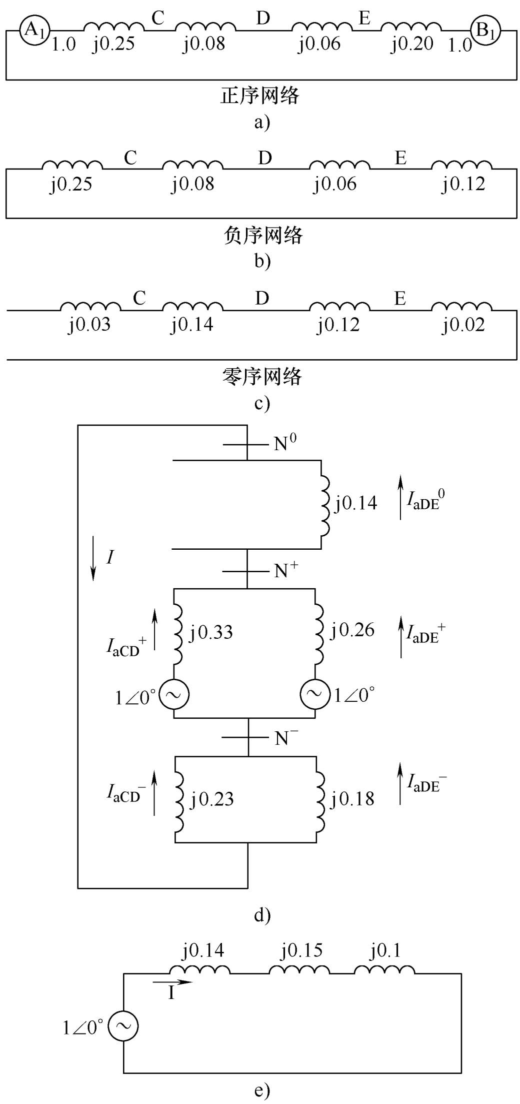


图　8-46

a）正序网络　b）负序网络　c）零序网络　d）母线 D 单线对地故障时的相序网络接线图　e）图 d 的简化电路

例 8.5 的相序网络用图 8-46 的等效电路计算：

$$I=\frac{V}{Z}=\frac{1\angle 0^\circ}{\mathrm{j}0.39}=2.56\angle -90^\circ$$

$$I_{\mathrm{aCD}}^{0}=0$$

$$I_{\mathrm{aCD}}^{+}=2.56\angle -90^\circ\times\frac{\mathrm{j}0.26}{\mathrm{j}0.26+\mathrm{j}0.33}=1.12\angle -90^\circ$$

$$I_{\mathrm{aCD}}^{-}=2.56\angle -90^\circ\times\frac{\mathrm{j}0.18}{\mathrm{j}0.18+\mathrm{j}0.23}=1.12\angle -90^\circ$$

线路 C—D 的实际线电流为

$$\begin{bmatrix}I_{\mathrm{aCD}}\\I_{\mathrm{bCD}}\\I_{\mathrm{cCD}}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{T}_{\mathrm{S}}]\begin{bmatrix}I_{\mathrm{aCD}}^{0}\\I_{\mathrm{aCD}}^{+}\\I_{\mathrm{aCD}}^{-}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\1.12\angle -90^\circ\\1.12\angle -90^\circ\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\mathrm{j}2.24\\\mathrm{j}1.12\\\mathrm{j}1.12\end{bmatrix}$$

线路 D—E 的线电流为

$$I_{\mathrm{aED}}^{0}=I=2.56\angle -90^\circ$$

$$I_{\mathrm{aED}}^{+}=I-I_{\mathrm{aCD}}^{+}=1.44\angle -90^\circ$$

$$I_{\mathrm{aED}}^{-}=I-I_{\mathrm{aCD}}^{-}=1.44\angle -90^\circ$$

$$\begin{bmatrix}I_{\mathrm{aED}}\\I_{\mathrm{bED}}\\I_{\mathrm{cED}}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{T}_{\mathrm{S}}]\begin{bmatrix}I_{\mathrm{aED}}^{0}\\I_{\mathrm{aED}}^{+}\\I_{\mathrm{aED}}^{-}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}2.56\angle -90^\circ\\1.44\angle -90^\circ\\1.44\angle -90^\circ\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\mathrm{j}5.44\\-\mathrm{j}1.12\\-\mathrm{j}1.12\end{bmatrix}$$

母线 D 的 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{th}}$ 也可以用 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{+}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{-}$ 和 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{0}$ 计算，它们分别是

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{+}=\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}\mathrm{C}&\mathrm{D}&\mathrm{E}\end{array}\\\begin{bmatrix}\mathrm{j}0.14&\mathrm{j}0.11&\mathrm{j}0.08\\\mathrm{j}0.11&\mathrm{j}0.15&\mathrm{j}0.11\\\mathrm{j}0.08&\mathrm{j}0.11&\mathrm{j}0.13\end{bmatrix}\end{array}\begin{array}{c}\mathrm{C}\\\mathrm{D}\\\mathrm{E}\end{array},$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{-}=\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}\mathrm{C}&\mathrm{D}&\mathrm{E}\end{array}\\\begin{bmatrix}\mathrm{j}0.10&\mathrm{j}0.07&\mathrm{j}0.04\\\mathrm{j}0.07&\mathrm{j}0.10&\mathrm{j}0.07\\\mathrm{j}0.04&\mathrm{j}0.07&\mathrm{j}0.08\end{bmatrix}\end{array}\begin{array}{c}\mathrm{C}\\\mathrm{D}\\\mathrm{E}\end{array},$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}^{0}=\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}\mathrm{C}&\mathrm{D}&\mathrm{E}\end{array}\\\begin{bmatrix}\mathrm{j}0.28&\mathrm{j}0.14&\mathrm{j}0.02\\\mathrm{j}0.14&\mathrm{j}0.14&\mathrm{j}0.02\\\mathrm{j}0.02&\mathrm{j}0.02&\mathrm{j}0.02\end{bmatrix}\end{array}\begin{array}{c}\mathrm{C}\\\mathrm{D}\\\mathrm{E}\end{array}$$

母线 D 的正序戴维南阻抗为 $Z_{\mathrm{Th,D}}^{+}=Z_{\mathrm{DD}}^{+}=\mathrm{j}0.15$。

母线 D 的负序戴维南阻抗为 $Z_{\mathrm{Th,D}}^{-}=Z_{\mathrm{DD}}^{-}=\mathrm{j}0.10$。

母线 D 的零序戴维南阻抗为 $Z_{\mathrm{Th,D}}^{0}=Z_{\mathrm{DD}}^{0}=\mathrm{j}0.14$。

上述值与图 8-46e 显示的值相同，相应的相序电流可按前述方法计算。相序网

络中的电流流向如图 8-47 所示。

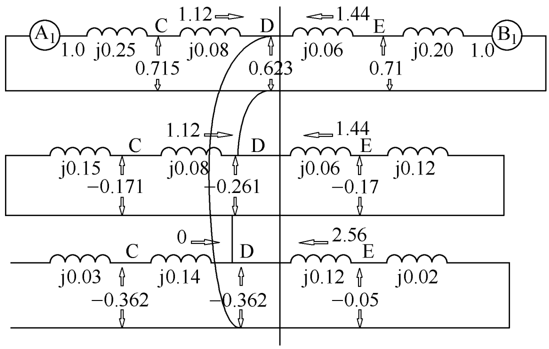


图 8-47　例 8.5 相序网络中的电流流向[㊀]

例 8.6　考虑图 8-48 给出的电网。

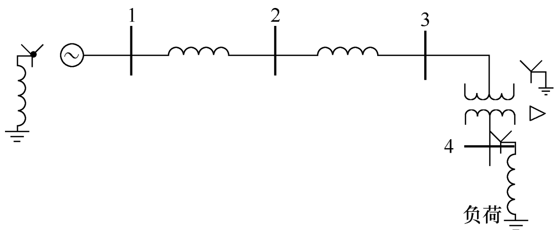


图 8-48　例 8.6 的系统

容量基值为 100MVA，相序网络参数为

$$Z_G^+ = Z_G^- = j0.1\text{pu}, Z_G^0 = j0.05\text{pu}$$
$$Z_{12}^+ = Z_{12}^- = j0.3\text{pu}, Z_{12}^0 = j0.6\text{pu}$$
$$Z_{23}^+ = Z_{23}^- = j0.4\text{pu}, Z_{23}^0 = j0.5\text{pu}$$
$$Z_{\text{Trans}}^+ = Z_{\text{Trans}}^- = Z_{\text{Trans}}^0 = j0.08\text{pu}$$

假定负荷为

$$S_{\text{Load}} = 1 + j0.5\text{pu}$$

负荷电压为

$$V_L = 0.9\angle -4.0°\text{pu}$$

发电机接地阻抗等于 j0.01pu。对于母线 2 的单线对地故障，进行以下计算：

1）从母线 1 及母线 3 到母线 2（故障母线）的故障电流，负荷忽略不计。

2）同 1），但把负荷考虑在内。

㊀ 译者注：原图顶部标有“三相故障（3ϕ fault）”字样，与正文内容不对应，故删去。

3）同 1)，但假定发电机不接地。

解

1）母线 2 单线对地故障，不考虑负荷的相序电路如图 8-49 所示。

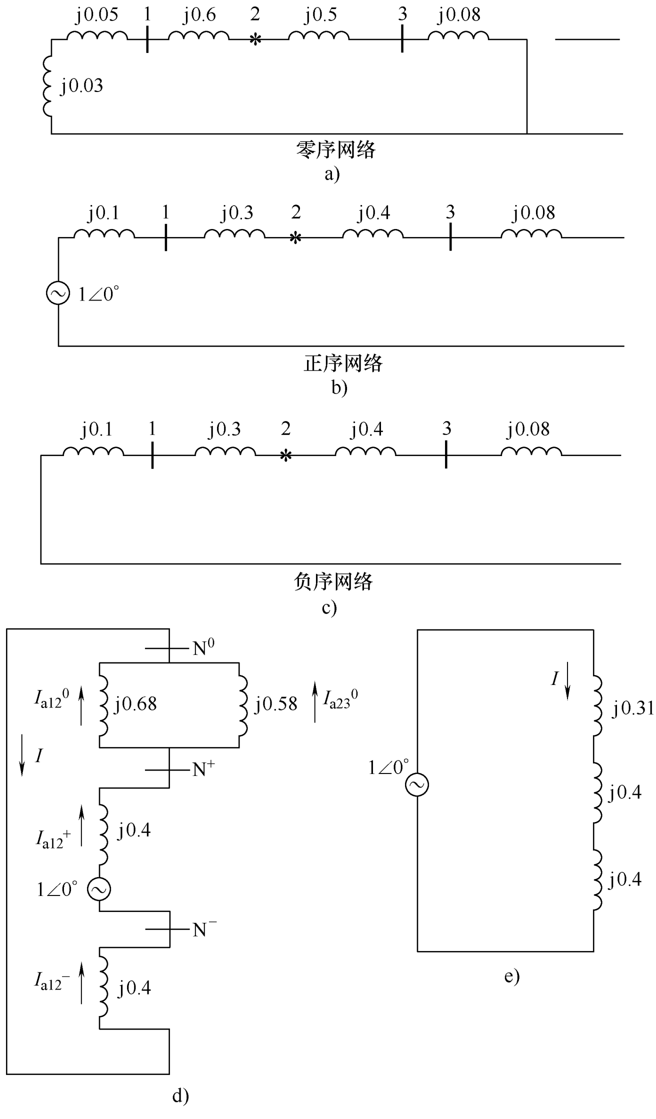


图 8-49 例 8.6 第 1 部分

a）零序网络 b）正序网络 c）负序网络 d）母线 2 单线对地故障时的相序网络接线图

e）图 d 的简化电路

由图 8-49，可计算相序电流如下：

$$I=\frac{V}{Z}=\frac{1\angle 0^\circ}{\mathrm{j}1.11}=0.9\angle -90^\circ$$

$$I_{a12}^{0}=0.9\angle-90^{\circ}\times\frac{j0.58}{j0.58+j0.65}=0.42\angle-90^{\circ}$$

$$I_{a12}^{+}=I_{a12}^{-}=I=0.9\angle-90^{\circ}$$

线路 1—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix}I_{a12}\\I_{b12}\\I_{c12}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{T}_{S}]\begin{bmatrix}I_{a12}^{0}\\I_{a12}^{+}\\I_{a12}^{-}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^{2}&a\\1&a&a^{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.42\angle-90^{\circ}\\0.9\angle-90^{\circ}\\0.9\angle-90^{\circ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-j2.22\\j0.48\\j0.48\end{bmatrix}$$

线路 3—2 的相序电流为

$$I_{a32}^{0}=I-I_{a12}^{0}=0.48\angle-90^{\circ}$$

$$I_{a32}^{+}=I_{a32}^{-}=0$$

线路 3—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix}I_{a32}\\I_{b32}\\I_{c32}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{T}_{s}]=\begin{bmatrix}I_{a32}^{0}\\I_{a32}^{+}\\I_{a32}^{-}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^{2}&a\\1&a&a^{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.48\angle-90^{\circ}\\0\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-j0.48\\-j0.48\\-j0.48\end{bmatrix}$$

母线 2 的 $\boldsymbol{Z}_{th}$也可以用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^{+}$、$\boldsymbol{Z}_{Bus}^{-}$和 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^{0}$计算，它们分别是

$$\boldsymbol{Z}_{Bus}^{+}=\boldsymbol{Z}_{Bus}^{-}=\begin{bmatrix}j0.1&j0.1&j0.1\\j0.1&j0.4&j0.4\\j0.1&j0.4&j0.8\end{bmatrix},\boldsymbol{Z}_{Bus}^{0}=\begin{bmatrix}j0.07&j0.04&j0.01\\j0.04&j0.31&j0.04\\j0.01&j0.04&j0.07\end{bmatrix}$$

母线 2 的正序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^{+}=Z_{22}^{+}=j0.4$；

母线 2 的负序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^{-}=Z_{22}^{-}=j0.4$；

母线 2 的零序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^{0}=Z_{22}^{0}=j0.31$。

从图 8-49e 可以看出，戴维南阻抗的数值与用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}$相序矩阵计算的结果相同。

2）把负荷考虑在内，等效△联结负荷为

$$\overline{Z}_{Y}=\frac{V^{2}}{S^{*}}=\frac{(0.9/\sqrt{3})^{2}}{1-j0.5}=0.24\angle26.6^{\circ}$$

$$\overline{Z}_{\Delta}=3\overline{Z}_{Y}=0.72\angle26.6^{\circ}$$

$$Z_{load00}=Z_{load11}=Z_{load22}=0.72\angle26.6^{\circ}$$

由图 8-50，可计算相序电流如下：

$$Z_{th}^{0}=\frac{j0.68\times j0.58}{j0.68+j0.58}=j0.31$$

$$Z_{th}^{+}=Z_{th}^{-}=\frac{j0.4\times(0.64+j0.8)}{(j0.4)+(0.64+j0.8)}=0.06+j0.3$$

$$V_{th}^{+}=\frac{1\angle0^{\circ}\times(0.64+j0.8)}{(j0.4)+(0.64+j0.8)}=0.75\angle-10.58^{\circ}$$

$$I=\frac{0.75\angle-10.58^{\circ}}{0.06+j0.3+0.06+j0.3+j0.31}=0.82\angle-93^{\circ}$$

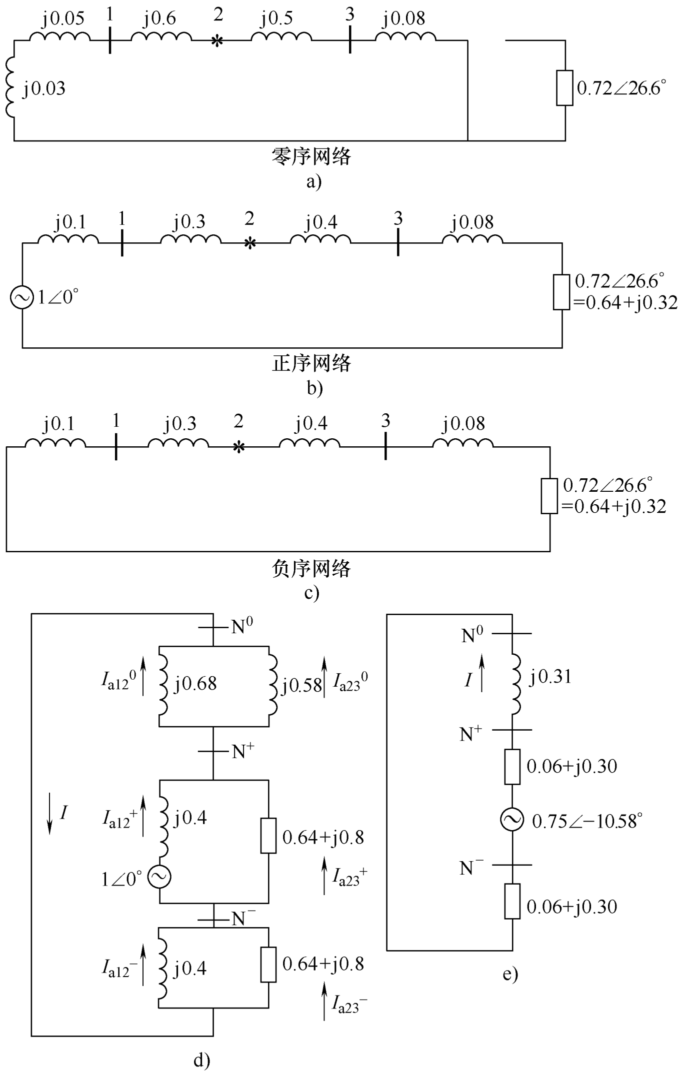


图 8-50 例 8.6 第 2）部分

a）零序网络 b）正序网络 c）负序网络 d）母线 2 单线对地故障时的相序网络接线图

e）图 d 的简化电路

$$I_{12}^{0}=\frac{0.82\angle-93°\times \mathrm{j}0.58}{\mathrm{j}0.58+\mathrm{j}0.68}=0.38\angle-93°$$

$$I_{12}^{+}=\frac{0.82\angle-93°\times(0.64+\mathrm{j}0.8)-0.75\angle-10.88°}{\mathrm{j}0.4+0.64+\mathrm{j}0.8}=0.32\angle-167°$$

$$I_{12}^{-}=\frac{0.82\angle-93°\times(0.64+\mathrm{j}0.8)}{\mathrm{j}0.4+0.64+\mathrm{j}0.8}=0.62\angle-103°$$

线路 1—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a12} \\ I_{b12} \\ I_{c12} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a12}^0 \\ I_{a12}^+ \\ I_{a12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.38\angle -93^\circ \\ 0.32\angle -167^\circ \\ 0.62\angle -103^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.16\angle -114^\circ \\ 0.67\angle 8^\circ \\ 0.32\angle -142^\circ \end{bmatrix}$$

线路 3—2 的相序电流为

$$I_{32}^0 = I - I_{12}^0 = 0.44\angle -93^\circ$$
$$I_{32}^+ = I - I_{12}^+ = 0.79\angle -70^\circ$$
$$I_{32}^- = I - I_{12}^- = 0.24\angle -65^\circ$$

线路 3—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a32} \\ I_{b32} \\ I_{c32} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a32}^0 \\ I_{a32}^+ \\ I_{a32}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.44\angle -93^\circ \\ 0.79\angle -70^\circ \\ 0.24\angle -65^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.44\angle -106^\circ \\ 0.35\angle -145^\circ \\ 0.62\angle -8.97^\circ \end{bmatrix}$$

母线 2 的 $\boldsymbol{Z}_{th}$ 也可以用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^+$、$\boldsymbol{Z}_{Bus}^-$ 和 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^0$ 计算，它们分别是

$$\boldsymbol{Z}_{Bus}^+ = \boldsymbol{Z}_{Bus}^- = \begin{bmatrix} 0.004 + j0.094 & 0.014 + j0.074 & 0.028 + j0.048 \\ 0.014 + j0.074 & 0.06 + j0.30 & 0.111 + j0.192 \\ 0.028 + j0.048 & 0.111 + j0.192 & 0.222 + j0.385 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{Z}_{Bus}^0 = \begin{bmatrix} j0.07 & j0.04 & j0.01 \\ j0.04 & j0.31 & j0.04 \\ j0.01 & j0.04 & j0.07 \end{bmatrix}$$

母线 2 的正序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^+ = Z_{22}^+ = 0.06 + j0.3$；

母线 2 的负序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^- = Z_{22}^- = 0.06 + j0.3$；

母线 2 的零序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^0 = Z_{22}^0 = j0.31$。

从图 8-50e 可以看出，戴维南阻抗的数值与用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}$ 相序矩阵计算的结果相同。

3）无负荷，发电机不接地情况下，相序电路如图 8-51 所示。

由图 8-51 计算相序电流如下：

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{1\angle 0^\circ}{j1.38} = 0.72\angle -90^\circ$$
$$I_{a12}^0 = 0$$
$$I_{a12}^+ = I_{a12}^- = I = 0.72\angle -90^\circ$$

线路 1—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a12} \\ I_{b12} \\ I_{c12} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a12}^0 \\ I_{a12}^+ \\ I_{a12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.72\angle -90^\circ \\ 0.72\angle -90^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.44 \\ j0.72 \\ j0.72 \end{bmatrix}$$

线路 3—2 的相序电流为

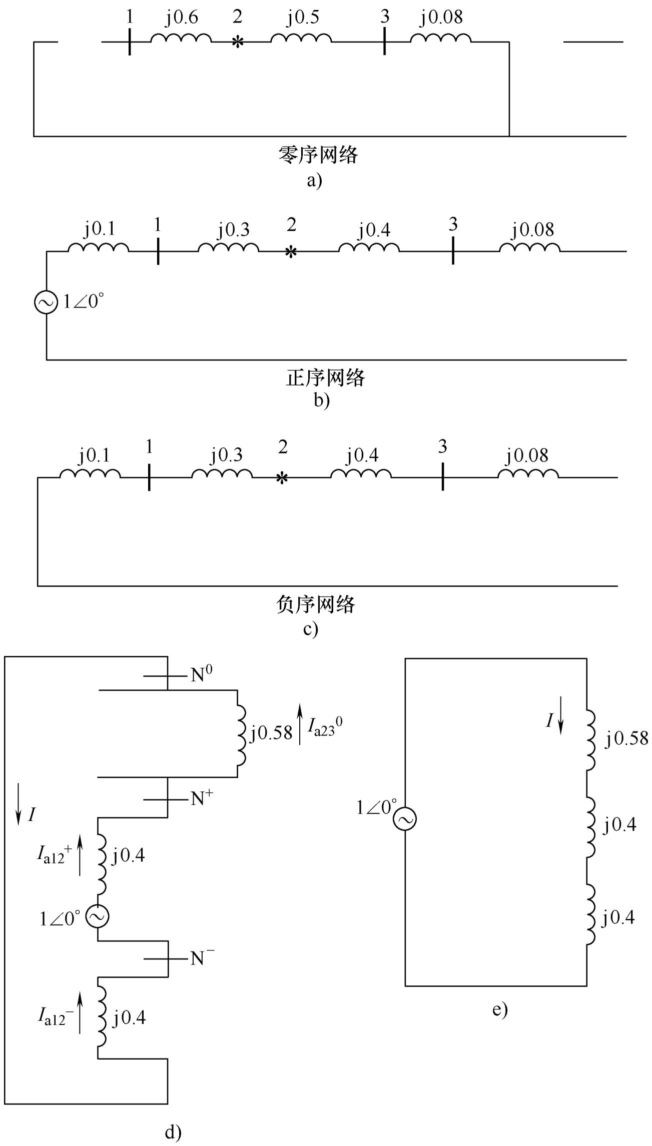


图 8-51　例 8.6 第 3）部分

a）零序网络　b）正序网络　c）负序网络　d）母线 2 单线对地故障时的相序网络接线图
e）图 d 的简化电路

$$I_{a32}^{0}=I=0.72\angle-90°$$

$$I_{a32}^{+}=I_{a32}^{-}=0$$

线路 3—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a32} \\ I_{b32} \\ I_{c32} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a32}^0 \\ I_{a32}^+ \\ I_{a32}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.72\angle -90° \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{j}0.72 \\ -\mathrm{j}0.72 \\ -\mathrm{j}0.72 \end{bmatrix}$$

母线 2 的 $\boldsymbol{Z}_{th}$ 也可以用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^+$、$\boldsymbol{Z}_{Bus}^-$ 和 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^0$ 计算，它们分别是

$$\boldsymbol{Z}_{Bus}^+ = \boldsymbol{Z}_{Bus}^- = \begin{bmatrix} \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.1 \\ \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.4 & \mathrm{j}0.4 \\ \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.4 & \mathrm{j}0.8 \end{bmatrix}, \boldsymbol{Z}_{Bus}^0 = \begin{bmatrix} \mathrm{j}1.18 & \mathrm{j}0.58 & \mathrm{j}0.08 \\ \mathrm{j}0.58 & \mathrm{j}0.58 & \mathrm{j}0.08 \\ \mathrm{j}0.08 & \mathrm{j}0.08 & \mathrm{j}0.08 \end{bmatrix}$$

母线 2 的正序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^+ = Z_{22}^+ = \mathrm{j}0.4$；

母线 2 的负序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^- = Z_{22}^- = \mathrm{j}0.4$；

母线 2 的零序戴维南阻抗为 $Z_{Th,2}^0 = Z_{22}^0 = \mathrm{j}0.58$。

从图 8-51e 可以看出，戴维南阻抗的数值与用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}$ 相序矩阵计算的结果相同。

例 8.7　对于例 8.6，假定母线 2 发生线间故障，计算每条线路的电流，不考虑负荷。

解

线间故障的等效相序电路如图 8-52 所示。

由图 8-52 计算的母线 2 线间故障的相序电流为

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{1\angle 0°}{\mathrm{j}0.8} = 1.25\angle -90°$$

$$I_{a12}^0 = 0$$

$$I_{a12}^+ = I = 1.25\angle -90°$$

$$I_{a12}^- = -I = 1.25\angle 90°$$

线路 1—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a12} \\ I_{b12} \\ I_{c12} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a12}^0 \\ I_{a12}^+ \\ I_{a12}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.25\angle -90° \\ 1.25\angle 90° \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.17\angle 180° \\ 2.17\angle 0° \end{bmatrix}$$

线路 3—2 的相序电流为

$$I_{a32}^0 = 0$$

$$I_{a32}^+ = -I_{a32}^- = 0$$

线路 3—2 的实际电流为

$$\begin{bmatrix} I_{a32} \\ I_{b32} \\ I_{c32} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{T}_S] \begin{bmatrix} I_{a32}^0 \\ I_{a32}^+ \\ I_{a32}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

母线 2 的 $\boldsymbol{Z}_{th}$ 也可以用 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^+$ 和 $\boldsymbol{Z}_{Bus}^-$ 计算，它们分别是

$$\boldsymbol{Z}_{Bus}^+ = \boldsymbol{Z}_{Bus}^- = \begin{bmatrix} \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.1 \\ \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.4 & \mathrm{j}0.4 \\ \mathrm{j}0.1 & \mathrm{j}0.4 & \mathrm{j}0.8 \end{bmatrix}$$

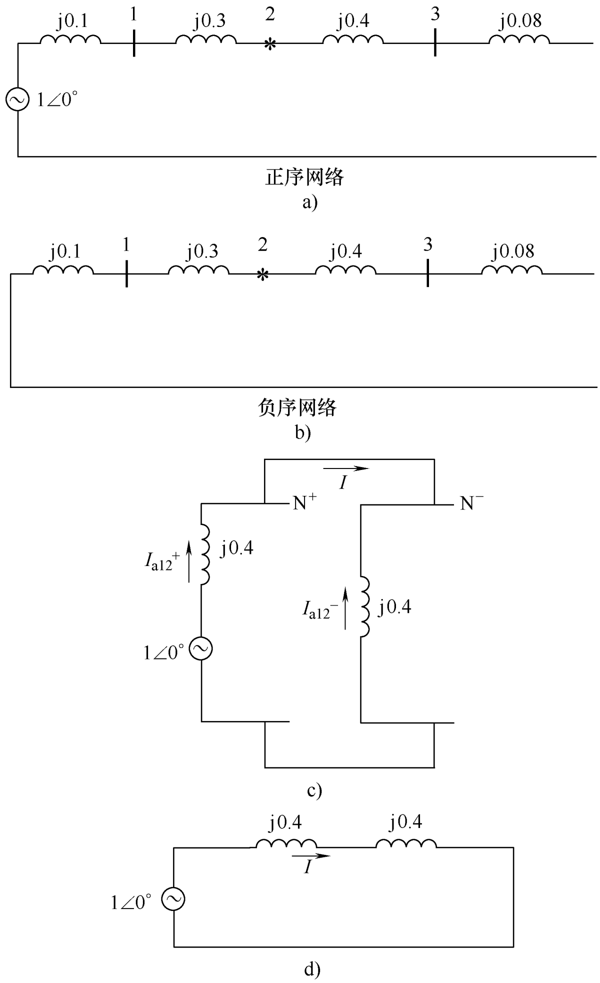


图 8-52　例 8.7

a）正序网络　b）负序网络　c）母线 2 线间故障时的相序网络接线图

d）图 c 的简化电路

母线 2 的正序戴维南阻抗为 $Z_{\mathrm{Th},2}^{+}=Z_{22}^{+}=\mathrm{j}0.4$；

母线 2 的负序戴维南阻抗为 $Z_{\mathrm{Th},2}^{-}=Z_{22}^{-}=\mathrm{j}0.4$。

从图 8-52d 可以看出，戴维南阻抗的数值与用 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Bus}}$ 相序矩阵计算的结果相同。

习　　题

8.1　考虑图 8-53 的典型系统。

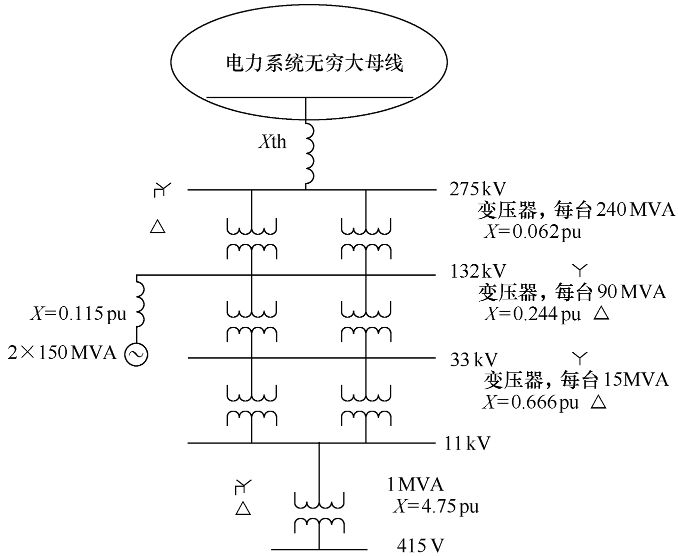


图 8-53　一个典型电网系统

所有阻抗都是标幺值，容量基值为 100MVA。

发电机投运数量最多时，$X_{th}=0.01$；

发电机投运数量最少时，$X_{th}=0.015$；

进行以下计算：

1）415V 母线的 SCC，所有变压器都投运，但发电机 G_1 不投运。假定发电机投运数量最多。

2）415V 母线的 SCC，所有变压器和 G_1 都投运。假定一台发电机投运。

8.2　考虑图 8-54 给出的系统。

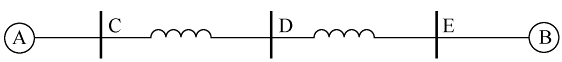


图 8-54　习题 8.2 的单线图

发电机 A：

$$X''_{G(1)}=0.25, X''_{G(2)}=0.15, X''_{G(0)}=0.03\text{pu}$$

发电机 B：

$$X''_{G(1)}=0.2, X''_{G(2)}=0.12, X''_{G(0)}=0.02\text{pu}$$

输电线 C—D：$Z_1=Z_2=\text{j}0.08\text{pu}$，$Z_0=\text{j}0.14\text{pu}$；

输电线 D—E：$Z_1=Z_2=\text{j}0.06\text{pu}$，$Z_0=\text{j}0.12\text{pu}$；

所有数值都是标幺值，容量基值为 100MVA。

假定发电机 A 是Y联结且不接地，发电机 B 为Y联结但接地，计算母线 D 单线对地故障时母线 C、D、E 的电流和实际相电压（即 V_a、V_b、V_c 的标幺值）。

8.3　考虑图 8-55 所示电网。

相序网络数据如下：

发电机：20kV，100MVA，10% 正序阻抗，负序阻抗 = 正序阻抗，零序阻抗为 8%，以发电

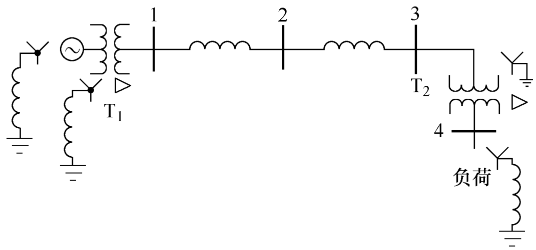


图 8-55　习题 8.3 的系统

机额定值为基值；

输电线：母线 1—2 长度为 50km，电抗为 0.5Ω/km；母线 2—3 长度为 100km，电抗为 0.7Ω/km；

变压器 T_1：20kV/138kV，8% 电抗，150MVA；

变压器 T_2：138kV/13.8kV，10% 电抗，200MVA；

输电线相序阻抗：$Z_1 = Z_2 =$ j0.06pu，$Z_0 =$ j0.12pu，容量基值 100MVA；

变压器相序阻抗：正序 = 负序 = 零序；

负荷：$S_{\text{load}} = 50\text{MVA}$，功率因数 = 0.95 滞后；

发电机接地阻抗为 j0.01pu，以它的额定值为基值。

计算正序、负序和零序网络的标幺值模型，以 100MVA 为基值。

8.4　对于习题 8.3，进行以下计算：

1）如果发电机设置为高于其额定值 5%，计算负荷电压。

2）对于母线 3 双线对地故障，求从母线 1 和母线 2 流向母线 3（故障母线）的故障电流，负荷忽略不计。

8.5　对于习题 8.3，进行以下计算：

1）计算母线 2 单线对地故障，但把负荷考虑在内。

2）与 1）相同，但假定发电机不接地。

8.6　考虑图 8-56 给出的微电网。

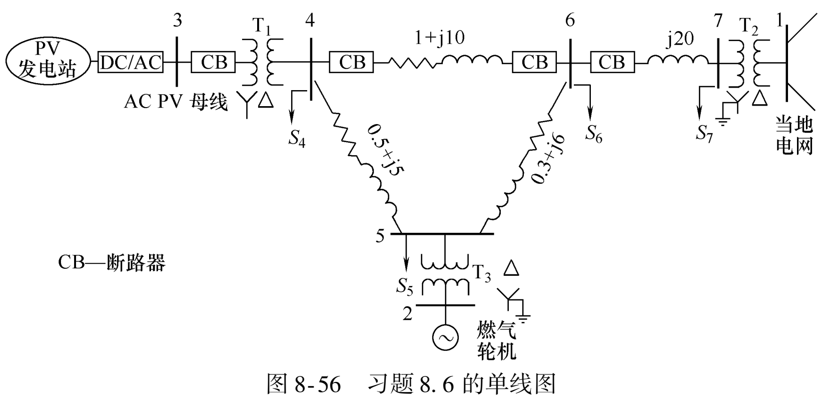


图 8-56　习题 8.6 的单线图

输电线阻抗在单线图中给出（见图 8-56）。

系统数据如下：

PV 发电站：2MW，AC460V；正序、负序和零序阻抗为 10%；

燃气轮机：正序参数为 10MVA，3.2kV，10% 电抗；

相序阻抗：负序 = 正序，零序 = 1/2 正序；

变压器相序阻抗：正序 = 负序 = 零序；

变压器 T_1：10MVA，460V/13.2kV，7% 阻抗；

变压器 T_2：25MVA，13.2kV/69kV，9% 阻抗；

变压器 T_3：20MVA，13.2kV/3.2kV，8% 阻抗；

负荷：S_4 = 4MVA，功率因数为 0.9 滞后；S_5 = 8MVA，功率因数为 0.9 滞后；S_6 = 10MVA，功率因数为 0.9 超前；S_7 = 5MVA，功率因数为 0.85 滞后；

当地电网：正序、负序和零序内电抗为 10Ω；内电抗可忽略。

进行以下计算：

1）正序、负序和零序标幺值阻抗模型。

2）忽略负荷，计算母线 4 单线对地故障。

3）计算负荷电压；使用负荷阻抗模型计算母线 4 单线对地故障。

8.7　考虑图 8-57 给出的微电网。

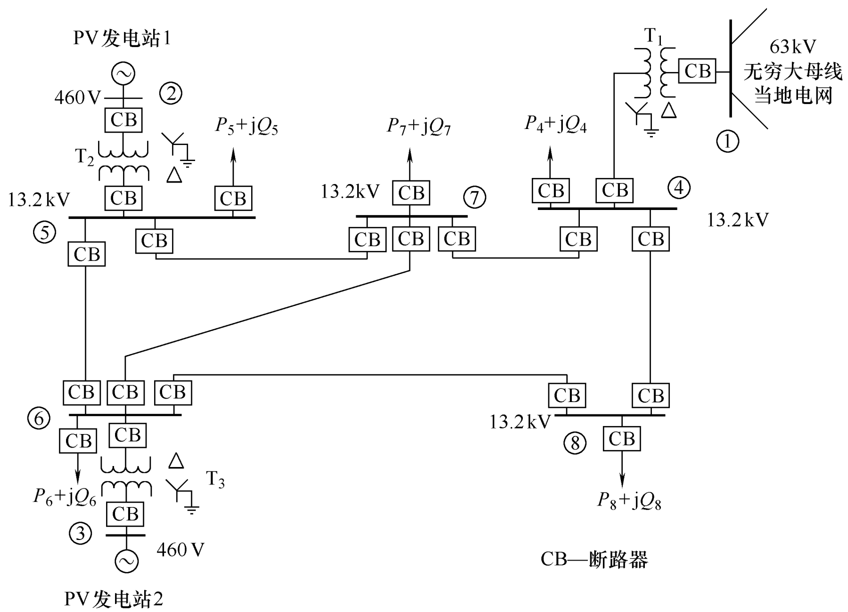


图 8-57　分布式发电的微电网接入当地电网

系统数据如下：

当地电网 SCC 为 1600MVA；

PV 发电站：不接地，正序、负序和零序内电抗（仅阻性分量）值约为 50%，容量 100MVA；

变压器：低压侧：460V，Y联结，中性点接地；高压侧：13.2kV，△联结，10% 电抗，10MVA；

当地电网变压器：20MVA，63kV/13.2kV，7%电抗；

输电线：电阻为0.0685Ω/mile，线路半充电导纳（$Y'/2$）为11Ω/mile。[一] 线路4—7为10mile，线路4—8为7mile，线路5—6为12mile，线路5—7为7mile，线路6—7为6mile，线路6—8为8mile；

输电线相序阻抗：正序=负序，零序=2×正序阻抗。

进行以下计算：

1）正序、负序和零序阻抗标幺值等效模型，以20MVA为基值。

2）对于母线4三相故障，计算母线4的SCC。

8.8　对于习题8.7，母线1发生单线对地故障，计算接地故障电流。

8.9　对于习题8.7，为提高系统安全性，每个配电网络和与当地电网的互联都使用两台相同的变压器。计算母线4的SCC。

8.10　对于习题8.7，假定变压器 T_1 联结方式是接地Y-Y。计算母线4的单线对地故障电流。[二]

参考文献

1. Gross AC. Power system analysis. New York: Wiley; 1986.
2. El-Hawary ME. Electric power systems: design and analysis. Reston, VA: Reston Publishing; 1983.
3. IEEE Brown Book. IEEE recommended practice for power system analysis. New York: Wiley-Interscience; 1980.
4. Grainger J, Stevenson WD. Power systems analysis. New York: McGraw Hill; 2008.
5. Duncan Glover J, Sarma MS. Power system analysis and design. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Thomson Learning; 2002.
6. Stagg GW, El-Abiad AH. Computer methods in power system analysis. New York: McGraw Hill; 1968.
7. Bergen A, Vittal V. Power systems analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 2000.
8. Fortescue CL. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. AIEE Transactions 1918; 37(part II):1027–1140.

[一] 译者注：原文如此。但这里使用的单位不对（应为 Ω^{-1}/mile），数值的数量级也相差太大。本章8.9.1节的例8.3中，$Y'/2=11\times10^{-6}\Omega^{-1}$/mile，可以参考。

[二] 译者注：原文还有一个与习题8.10完全相同的习题8.11，此处把它删掉了。

附　　录

附录 A　复　　数

复数运算在电力系统稳态运行计算中非常重要。本附录将复习复数运算的基本知识。复数是形式如下的量：

$$z = a + \mathrm{j}b \tag{A-1}$$

式中，a 和 b 都是实数，$\mathrm{j} = \sqrt{-1}$；a 为实部，b 为虚部。

图 A-1 是复平面，其中 $z^* = a - \mathrm{j}b$ 称为 z 的共轭复数。

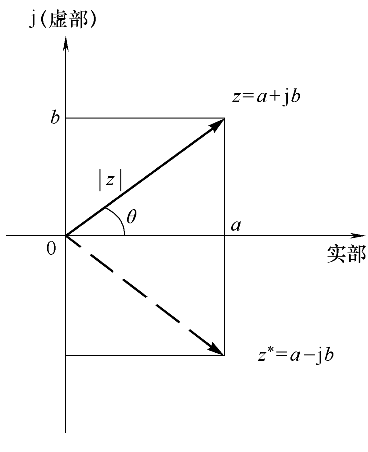


图 A-1　复数的表示法

复数可写为相量形式：

$$z = |z|(\cos\theta + \mathrm{j}\sin\theta) \tag{A-2}$$

$$z = |z|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} \tag{A-3}$$

$$z = |z|\angle\theta \tag{A-4}$$

式中，$|z|$是复数的模，而 θ 是复数的幅角。

复数在直角坐标与极坐标之间的转换可表示为

$$z = a + \mathrm{j}b \Rightarrow z = |z|\angle\theta$$

$$|z| = \sqrt{(a^2 + b^2)} \tag{A-5}$$

$$\theta = \arctan(b/a) \tag{A-6}$$

$$z = |z|\angle\theta \Rightarrow z = a + \mathrm{j}b$$

$$a = |z|\cos\theta \tag{A-7}$$

$$b = |z|\sin\theta \tag{A-8}$$

如下两个复数 z_1 和 z_2

$$z_1 = a + \mathrm{j}b,\ z_2 = c + \mathrm{j}d$$

它们的加减计算为

$$z_1 \pm z_2 = (a \pm c) + \mathrm{j}(b \pm d) \tag{A-9}$$

两个复数乘积的算法为㊀

$$z_1 \cdot z_2 = (ac - bd) + \mathrm{j}(ad + bc) \tag{A-10}$$

z_1 与它的共轭数相乘的结果是

$$z_1 z_1^* = (a + \mathrm{j}b)(a - \mathrm{j}b) = (a^2 + b^2)\angle 0° = |z_1|^2 \angle 0° \tag{A-11}$$

式中，z_1^* 是 z_1 的共轭数。

两个复数相除在直角坐标和极坐标中都可以进行。

在直角坐标中的算法为

$$z_1 = a + \mathrm{j}b,\ z_2 = c + \mathrm{j}d$$

$$\begin{aligned}\frac{z_1}{z_2} &= \frac{(a + \mathrm{j}b)}{(c + \mathrm{j}d)} = \frac{(a + \mathrm{j}b)(c - \mathrm{j}d)}{(c + \mathrm{j}d)(c - \mathrm{j}d)}, \\ &= \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + \mathrm{j}\,\frac{bc - ad}{c^2 + d^2}\end{aligned} \tag{A-12}$$

加减法在直角坐标中进行比较方便，但乘除法在直角坐标中计算则比较繁琐。

现在使用极坐标进行 z_1 和 z_2 的乘法计算。

$$z_1 = |z_1|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_1},\ z_2 = |z_2|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_2}$$

两个复数相乘只需将幅值相乘，幅角相加：

$$z_1 \cdot z_2 = |z_1||z_2|\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_1 + \theta_2)} \tag{A-13}$$

一般来说，一个复数的 n 次方为

$$z_1^n = |z_1|^n \mathrm{e}^{\mathrm{j}n\theta_1} = |z_1|^n\ (\cos n\theta_1 + \mathrm{j}\sin n\theta_1)$$

两个复数相除只需将它们的幅值相除，但幅角相减：

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{|z_1|}{|z_2|}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_1 - \theta_2)} \tag{A-14}$$

乘法和除法用相量形式进行比较方便。

㊀ 译者注：下面的原文对式（A-10）和式（A-12）的描述不通顺，而且有误，现根据公式调整了正文的叙述。

附录 B　输电线和配电线的典型数据

表 B-1　电导率 97.3%的冷拉铜导线典型特性[1]

导线尺寸		大约载流能力①/A	R_a，60Hz 下电阻（每根导线）/（Ω/mile）		X_a，感抗（每根导线，间距 1ft）/（Ω/mile）	X_a'，对地容抗（每根导线，间距 1ft）/（MΩ/mile）
圆密尔	mm^2		25℃	50℃	60Hz	60Hz
1000000	506	1300	0.0634	0.0685	0.400	0.0901
900000	456	1220	0.0695	0.0752	0.406	0.0916
800000	405	1130	0.0772	0.0837	0.413	0.0934
750000	380	1090	0.0818	0.0888	0.417	0.0943
700000	354	1040	0.0871	0.0947	0.422	0.0954
600000	304	940	0.1006	0.1095	0.432	0.0977
500000	253	840	0.1196	0.1303	0.443	0.1004
500000	253	840	0.1196	0.1303	0.445	0.1005
450000	228	780	0.1323	0.1443	0.451	0.1020
400000	202	730	0.1484	0.1619	0.458	0.1038
350000	177	670	0.1690	0.1845	0.466	0.1058
350000	177	670	0.1690	0.1845	0.460	0.1044
300000	152	610	0.1966	0.215	0.476	0.1080
300000	152	610	0.1966	0.215	0.470	0.1068
250000	126	540	0.235	0.257	0.487	0.1108
250000	126	540	0.235	0.257	0.481	0.1094
211600	107	480	0.278	0.303	0.497	0.1132
211600	107	490	0.278	0.303	0.491	0.1119
211600	107	480	0.278	0.303	0.503	0.1136
167800	85	420	0.350	0.382	0.505	0.1153
167800	85	420	0.350	0.382	0.518	0.1171
133100	67	360	0.440	0.481	0.532	0.1205
105500	53	310	0.555	0.607	0.546	0.1240
83690	42	270	0.699	0.765	0.560	0.1274
83690	42	270	0.692	0.757	0.557	0.1246

（续）

导线尺寸		大约载流能力①/A	R_a，60Hz下电阻（每根导线）/(Ω/mile)		X_a，感抗（每根导线，间距1ft）/(Ω/mile)	X_a'，对地容抗（每根导线，间距1ft）/(MΩ/mile)
圆密尔	mm^2		25℃	50℃	60Hz	60Hz
66370	33	230	0.882	0.964	0.574	0.1308
66370	33	240	0.873	0.955	0.571	0.1281
66370	33	220	0.864	0.945	0.581	0.1345
52630	26	200	1.112	1.216	0.588	0.1343
52630	26	200	1.101	1.204	0.585	0.1315
52630	26	190	1.090	1.192	0.595	0.1380
41740	21	180	1.388	1.518	0.599	0.1349
41740	21	170	1.374	1.503	0.609	0.1415
33100	16	150	1.750	1.914	0.613	0.1384
33100	16	140	1.733	1.895	0.623	0.1449
26250	13	130	2.21	2.41	0.628	0.1419
26250	13	120	2.18	2.39	0.637	0.1483
20820	10	110	2.75	3.01	0.651	0.1517
16510	8	90	3.47	3.80	0.665	0.1552

① 导线温度为75℃，环境温度为25℃，风速为1.4mile/h（2ft/s），频率为60Hz。

表B-2　强化钢芯铝线的典型特性

（ACSR；美国铝业公司，http://www.alcoa.com/global/en/home.asp）[1]

导线尺寸		大约载流能力①/A	R_a，60Hz下电阻（每根导线）/(Ω/mile)		X_a，感抗（每根导线，间距1ft）/(Ω/mile)	X_a'，对地容抗（每根导线，间距1ft）/(MΩ/mile)
圆密尔	mm^2		25℃	50℃（电流约为75%容量②）	60Hz	60Hz
1590000	805	1380	0.0591	0.0684	0.359	0.0814
1510500	765	1340	0.0622	0.0720	0.362	0.0821
1431000	725	1300	0.0656	0.0760	0.363	0.0830

（续）

导线尺寸		大约载流能力[①]/A	R_a，60Hz下电阻（每根导线）/(Ω/mile)		X_a，感抗（每根导线，间距1ft）/(Ω/mile)	X_a'，对地容抗（每根导线，间距1ft）/(MΩ/mile)
圆密尔	mm^2		25℃	50℃（电流约为75%容量[②]）	60Hz	60Hz
1351000	684	1250	0.0695	0.0803	0.369	0.0838
1272000	644	1200	0.0738	0.0851	0.372	0.0847
1192500	604	1160	0.0788	0.0906	0.376	0.0857
1113000	563	1110	0.0844	0.0969	0.380	0.0867
1033500	523	1060	0.0909	0.1035	0.385	0.0878
954000	483	1010	0.0982	0.1128	0.390	0.0890
900000	456	970	0.104	0.1185	0.393	0.0898
874500	443	950	0.108	0.1228	0.395	0.0903
795000	402	900	0.119	0.1378	0.401	0.0917
795000	402	900	0.117	0.1288	0.399	0.0912
795000	402	910	0.117	0.1288	0.393	0.0904
715500	362	830	0.132	0.1482	0.407	0.0932
715500	362	840	0.131	0.1442	0.405	0.0928
715500	362	840	0.131	0.1442	0.399	0.0920
666600	337	800	0.141	0.1601	0.412	0.0943
636000	322	770	0.148	0.1688	0.414	0.0950
636000	322	780	0.147	0.1618	0.412	0.0946
636000	322	780	0.147	0.1618	0.406	0.0937
605000	306	750	0.155	0.1775	0.417	0.0957
605000	306	760	0.154	0.1720	0.415	0.0953
556500	281	730	0.168	0.1859	0.420	0.0965

（续）

导线尺寸		大约载流能力①/A	R_a，60Hz 下电阻（每根导线）/（Ω/mile）		X_a，感抗（每根导线，间距 1ft）/（Ω/mile）	X_a'，对地容抗（每根导线，间距 1ft）/（MΩ/mile）
圆密尔	mm^2		25℃	50℃（电流约为 75% 容量②）	60Hz	60Hz
556500	281	730	0.168	0.1859	0.415	0.0957
477000	241	670	0.196	0.216	0.430	0.0988
477000	241	670	0.196	0.216	0.424	0.0980
397500	201	590	0.235	0.259	0.441	0.1015
397500	201	600	0.235	0.259	0.435	0.1006
336400	170	530	0.278	0.306	0.451	0.1039
336400	170	530	0.278	0.306	0.445	0.1032
300000	152	490	0.311	0.342	0.458	0.1057
300000	152	500	0.311	0.342	0.462	0.1049
266800	135	460	0.350	0.385	0.465	0.1074

① 导线温度为 75℃，环境温度为 25℃，风速为 1.4mile/h（2ft/s），频率为 60Hz。

② “电流约为 75% 容量”的含义是，电流为大约载流能力的 75%，该电流大约会在环境温度为 25℃、风速为 1.4mile/h 下使导线温度达到 50℃（温升 25℃）。

参考文献

1. Alcan Cable. Cable information. Available at http://www.cable.alcan.com/CablePublic/en-CA/Products/Energy+Cables/Bare+Overhead+Conductors/All+Aluminum+Conductor+AAC.htm. Accessed 2011 March 1.

附录 C 光伏组件的发电量与入射角的关系

估计太阳能发电量的基本问题在其他文献中有很多论述[1-9]。这里只概述太阳能功率作为与太阳位置相对关系的函数的估计方法。目的是使读者了解，作为注入微电网输入功率的太阳能光伏装置发出的电量取决于 PV 系统的位置。对详细分析

感兴趣的读者可以研究参考文献［1，2］。

要估计 PV 组件发出的电量，就需要确定组件相对太阳位置的倾角。倾角定义为水平面处于某具体位置时磁针所取位置。磁倾角在地磁赤道为 0°，在每个地磁极为 90°。辐照度定义为入射到给定表面辐射的强度，以 W/m^2 或 W/ft^2 为单位。太阳旋转时，阳光到达 PV 组件的角度就会变化。图 C-1 画出了一个 PV 组件的倾斜角。

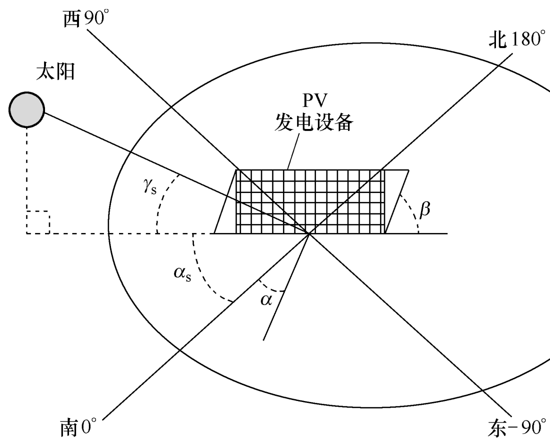


图 C-1　光伏组件倾斜角示意图[1]

图 C-1 中，α_s 是太阳天顶角，α 是 PV 组件的天顶角，β 是 PV 组件的倾角，γ_s 是太阳对地平线的高度角。基准角定义为正南，其值为 0°，东方为 -90°，西方为 90°。太阳高度角决定 PV 组件的辐照度。地球旋转时，太阳高度角每月、每日、每时都在变化。大气质量（Air Mass，AM）系数决定阳光到达 PV 组件需要经过的距离，可用式（C-1）表示。对一个具体位置算得的大气质量如图 C-2 所示。

$$AM = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \tag{C-1}$$

式（C-1）确定了大气质量和高度角之间的关系。到达地球大气的入射能量流称为太阳常数 S。太阳常数是入射波入射到距离为一个天文单位（Astronomical Unit，AU）的垂直平面的单位面积上的电磁能量。AU 定义为太阳到地球的距离。太阳常数 $S = 1367W/m^2$。太阳辐射落到单位面积上的总功率称为辐照度。太阳辐射穿过大气层到达 PV 组件表面时，一部分入射辐射会由于空气分子的散射和污染颗粒而丢失。

直接辐射光束是没有发散并直接到达地球表面的辐射能量。直接辐射光束穿过云层时会产生散射辐射。反射是从地球散射返回太空的短波长辐射部分。这些辐射（散射、直射和反射）的总和称为总辐射。大气质量确定了大气的明亮程度。辐照

度（W/m^2）在一个时段的积分就可以给出太阳能发电量。

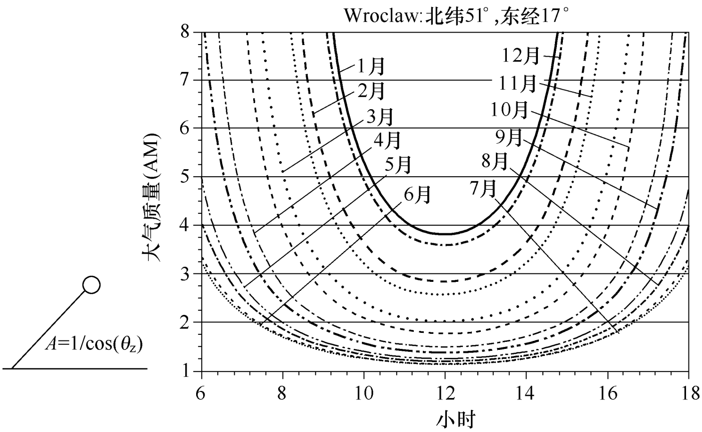


图 C-2 对一个具体位置算得的大气质量[9]

地球绕太阳在一个椭圆轨道平面上旋转。地球一年绕太阳旋转一周㊀。黄道平面指白天太阳绕地球旋转时在天空划过的视路径。地球自转轴与黄道平面法线的夹角始终为 23.45°。环绕地球的天球表示的是太阳与地球的关系。地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角 δ 称为赤纬角。该角在 3 月 20/21 日（春分）和 9 月 22/23 日（秋分）为 0°。在这些日子，太阳从正东升起，在正西落下。在夏至日 6 月 21/22 日，$\delta=23.45°$；而在冬至日 12 月 21/22 日，$\delta=-23.45°$。太阳正午和各角度的定义如图 C-3 所示。

图 C-4 中，天底点是天球直接位于某观察者下面的点，与天顶点相对[1]。天顶角是穿过太阳的子午线与当地子午线之间的夹角。子午线也称经线，它是地球表面从北极到南极的假想弧线。在太阳正午，该角度为 0°，越向东该角度越大。图 C-4 中，α 是太阳高度角，φ 是地球表面某地理位置的纬度。地球每天自转时，太阳赤纬角假定不变，等于其正午值，则倾斜平面的辐照度可表示为

$$\sin\alpha=\sin\delta\cdot\sin\varphi+\cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot\cos w=\cos\theta_z \tag{C-2}$$

$$\cos\varphi=\frac{(\sin\alpha\cdot\sin\varphi-\sin\delta)}{(\cos\alpha\cdot\cos\varphi)} \tag{C-3}$$

由式（C-2）和式（C-3），太阳时间角为

$$\omega_s=\arccos(-\tan\varphi\cdot\tan\delta) \tag{C-4}$$

式中，ω_s 是一年中每天太阳升起的角度，而 $-\omega_s$ 是每天太阳降落的角度。

太阳能的数量用水平面的总入射能量表示。每天的总辐射能量用 G 表示。各

㊀ 译者注：原文中此段叙述比较混乱，这里根据相关资料做了一些整理。

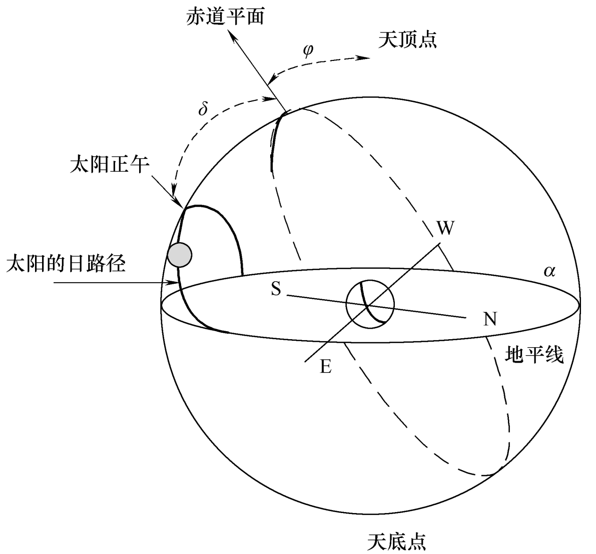


图 C-3　太阳正午和各角度的定义[9]

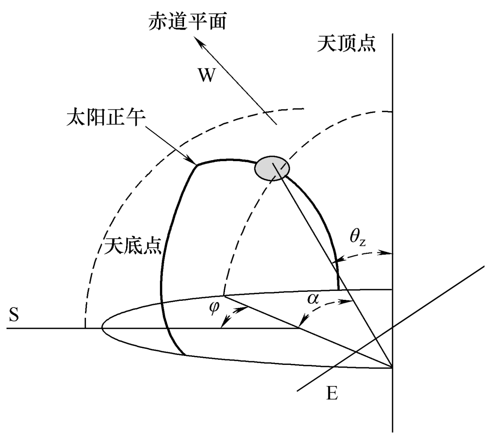


图 C-4　太阳正午和赤道各角度的定义[1]

辐射分量如图 C-5 所示。

地球表面某位置一天的总辐射值（G）用任何一月的一个典型日来估计。B_o 是大气层以上水平表面区域一天里接收的辐射能量，可用下式计算：

$$B_o = 24/\pi \cdot S \cdot \{1 + 33 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot d_n/365)\} \cdot \{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta\} \tag{C-5}$$

式中，ω_s 是时间角，d_n 是从 1 月 1 日（$d_n = 1$）起计算的日数，对 12 月 31 日，$d_n = 365$。以 B_o 为基准，可以估算 G 值和明亮度指标 KT 之间的关系为

$$KT = G/B_o \tag{C-6}$$

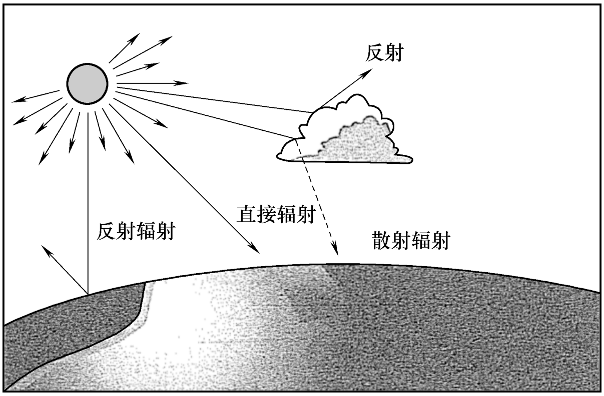


图 C-5 各辐射分量[9]

式（C-5）中，计算 B_o 是为了得到由于地球轨道的偏心率导致的地外辐射变化。计算漫射辐射 D 要使用总辐射的漫射分量指数 D/G。D/G 是明亮度指数 KT 的通用函数。$B=G-D$ 给出了单独的辐射光束和漫射辐射。

使用每个分量的角度关系可以得出漫射辐射 D 和倾斜平面上的宽束辐射 B。计算总反射可使用周围区域的反射系数。总反射是反射、散射和漫射之和。

要计算月平均辐射需要使用每月中间日的日总辐射 G、太阳常数 S（1367W/m^2）、现场地理纬度和该日的太阳倾斜角。表 C-1 列出了典型的反射系数。

表 C-1 典型反射系数

地表覆盖物	反 射 系 数
干燥裸露地面	0.2
干燥草地	0.3
沙漠	0.4
积雪	0.5 ~ 0.8

由式（C-6），明亮度指标 KT 可由日辐射数据 G 算得。

辐射损失（disuse irradiation）D 可用式（C-7）计算：

$$D/G = 1 - 1.13 \cdot KT \tag{C-7}$$

水平面的宽束辐射 B 可从 G 减去 D 求得：$B=G-D$。对水平面倾角为 β、朝南的光伏板上的宽束辐射 $B(\beta)$ 可以用水平面上的宽束辐射 B 估算。

$$B(\beta) = B \cdot \frac{\cos(\varphi-\beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin[\omega_s(\varphi-\beta)] + \omega_s(\varphi-\beta) \cdot \sin(\varphi-\beta)\sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta} \tag{C-8}$$

$$D(\beta) = \frac{1}{2} \cdot D \cdot (1 + \cos(\beta))$$

$$R(\beta) = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \rho \cdot (1 + \cos(\beta))$$

式中，$D(\beta)$ 是漫射辐射，$R(\beta)$ 是反射辐射。总辐射可以把 3 个分量相加来估算。

$$G(\beta) = B(\beta) + D(\beta) + R(\beta) \tag{C-9}$$

赤纬角 δ 可用式（C-10）估算。

$$\delta = 23.45\sin[360 \times (284 + n)/365] \tag{C-10}$$

可以用以下步骤估算倾斜平面上的辐射。

第 1 步：

$$\delta = 23.45\sin[360 \times (284 + n)/365]$$

太阳赤纬角是对于给定日 n 估计的。

第 2 步：

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta)$$

$$\omega_s' = \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan\delta) \tag{C-11}$$

式中，ω_s 是太阳赤纬角，φ 是地球上某位置的纬度。

因为地球每天自转一周，它对应的角度是经度 360°，24h。这意味着一天的长度是 $2\omega_s/15$。

第 3 步：水平面的宽束辐射是

$$B_o = 24/\pi \cdot S \cdot \{1 + 33 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot d_n/365)\} \cdot \{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta\} \tag{C-12}$$

式中，n 是一年中的日序数，$\omega_0 = \min\ \{\omega_s,\ \omega_s'\}$。

第 4 步：计算明亮度指标

$$KT = G/B \tag{C-13}$$

式中，KT 是明亮度指标；G 是该区域的太阳辐射数据。

第 5 步：计算漫射辐射

$$D = G \cdot (1 - 1.13KT) \tag{C-14}$$

第 6 步：计算宽束辐射

$$B = G - D \tag{C-15}$$

第 7 步：计算带倾角的宽束辐射

$$B(\beta) = B \cdot \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_0 + \omega_s(\varphi - \beta) \cdot \sin(\varphi - \beta)\sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta} \tag{C-16}$$

$$D(\beta) = \frac{1}{2} \cdot D \cdot (1 + \cos(\beta))$$

$$R(\beta) = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \rho \cdot (1 + \cos(\beta))$$

$$G(\beta)=B(\beta)+D(\beta)+R(\beta)$$

土耳其的电力市场监管部门提供了土耳其不同位置的辐照值数据。例 C.1 给出土耳其 Batman 市的日总辐照值。

例 C.1　假定一年 12 个月的每个月的日总辐照值（G）的样本值分别为 $G=$ [1900，2690，4070，5050，6240，7040，6840，6040，5270，3730，2410，1800]，且假定反射系数为 0.25。

1）计算（a）不同倾斜角度下的辐射值，（b）用表列出不同倾斜角下每月的辐照值，（c）不同倾斜角下一年的总辐照值，（d）求出每月和全年的最佳倾斜角。

2）如果 PV 组件的角度全年都固定为 24°，一个 PV 方阵表面积为 $100m^2$，组件效率为 15%，每天运行 5h，日照强度为 0.5，求它的年均发电量（kWh）。

解

1）使用前述的第 1 ~ 7 步计算每月辐照值。倾角 β 从 0°变到 90°，每级 12°。表 C-2 列出了计算结果。

表 C-2（a）　**不同角度下的辐照度：冬季**　　（单位：W/m^2）

倾　角	1 月	2 月	3 月
0°	1900	2690	4070
12°	2194	3016	4414
24°	2425	3253	4616
36°	2582	3390	**4667**
48°	**2660**	**3421**	4567
60°	2653	3344	4316
72°	2563	3164	3929
84°	2393	2887	3421
90°	2281	2716	3129

表 C-2（b）　**不同角度下的辐照度：春季**　　（单位：W/m^2）

倾　角	4 月	5 月	6 月
0°	5050	**6240**	**7040**
12°	5237	6231	6851
24°	**5252**	6016	6433
36°	5093	5595	5787

（续）

倾　　角	4 月	5 月	6 月
48°	4768	4986	4940
60°	4288	4214	3928
72°	3678	3320	2807
84°	2965	2356	1653
90°	2582	1870	1099

表 C-2（c）　**不同角度下的辐照度：夏季**　　（单位：W/m^2）

倾　　角	7 月	8 月	9 月
0°	**6840**	6040	5270
12°	6721	**6180**	5699
24°	6368	6095	**5915**
36°	5784	5784	5910
48°	4991	5259	5682
60°	4024	4542	5241
72°	2935	3671	4608
84°	1795	2689	3810
90°	1237	2175	3361

表 C-2（d）　**不同角度下的辐照度：秋季和全年平均**　（单位：W/m^2）

倾　　角	10 月	11 月	12 月	全 年 平 均
0°	3730	2410	1800	4233
12°	4221	2803	2117	4640
24°	4570	3110	2371	**4702**
36°	4760	3316	2553	4602
48°	**4785**	**3415**	2653	4344
60°	4641	3398	**2667**	3938
72°	4337	3270	2595	3406
84°	3885	3035	2440	2778
90°	3609	2880	2333	2439

表 C-2 列出了倾角从 0°到 90°，每级 12°的辐照值（以 W/m^2 为单位）。最大辐照值发生于倾角 24°情况下，如果 PV 组件固定不变的话。在这一倾角下，辐射能量为 4702Wh/m^2。该角度下的辐射能量比水平面几乎大 469Wh/m^2。如果倾角每月都能变化，则发电量几乎为 4923.5Wh/m^2。使用最佳辐射角度可以大大提高 PV

系统月辐射最大值。

2）由表 C-2，24°倾角下 12 个月的平均辐照值为 $4702W/m^2$。因此，在 0.5 日照强度下，$1m^2$ 表面获得的功率为

$$0.5\ 日照强度下的功率 = 0.5 \times 4702W/m^2 = 2351W/m^2$$

效率为 15%，每天运行 5h 情况下，PV 方阵全年可发出的电量为

$$24°倾角下\ PV\ 的发电量 = 0.15 \times 2351 \times 5 \times 365Wh/m^2 = 644kWh/m^2$$

因此，$100m^2$ PV 方阵的发电量为

$$100m^2\ PV\ 方阵的发电量 = 100 \times 644kWh = 64.4MWh$$

美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）提供了美国主要城市任意给定表面区域的日总辐照值（G）。读者最好访问 NREL 网站去获得 PV 系统的数据。

例 C.2 假定俄亥俄州 Columbus 市水平面上全年的日总辐照值（G）为 G = [1800，2500，3500，4600，5500，6000，5900，5300，4300，3100，1900，1500]。

Columbus 市的纬度是 40°。假定反射系数为 0.25。

1）计算俄亥俄州 Columbus 市的辐照值表。

2）在 6 月，如果 PV 组件倾角为 36°，日照强度为 0.4，每天运行 7h，效率为 15%，计算 $1500ft^2$ 面积上可捕捉的总能量（kWh）。

解

1）按照例 C.1 的步骤。可得到表 C-3 的数据。

2）由表 C-3（b），在 6 月份，36°倾角，1 个日照强度下的辐照值为 $5109W/m^2$。

因此，$1m^2$ 表面在 0.4 个日照强度下接收到的功率是

$$0.4\ 个日照强度下的功率 = 0.4 \times 5109W/m^2 = 2044W/m^2$$

效率为 15%，每天运行 7h 情况下，6 月份 PV 方阵可发出的电量为

$$PV\ 发电量 = 0.15 \times 2044 \times 7 \times 30Wh/m^2 = 64.38kWh/m^2$$

$$1m^2 = 10.76ft^2$$

$$单位面积（1ft^2）发电量 = 64.38/10.67kWh/ft^2 = 5.98kWh/ft^2$$

因此，$1500ft^2$ PV 方阵的发电量为

$$6\ 月份总发电量 = 1500 \times 5.98kWh = 8.97MWh$$

表 C-3（a） **俄亥俄州 Columbus 市的辐照度数据：冬季**

（单位：W/m^2）

倾　角	1 月	2 月	3 月
0°	1800	2500	3500
12°	2112	2822	3782
24°	2363	3061	3948

（续）

倾　　角	1月	2月	3月
36°	2541	3206	**3992**
48°	2638	**3250**	3911
60°	**2650**	3193	3708
72°	2577	3035	3394
84°	2422	2784	2981
90°	2315	2627	2743

表 C-3（b）　俄亥俄州 Columbus 市的辐照度数据：春季

（单位：W/m^2）

倾　　角	4月	5月	6月
0°	4600	5500	**6000**
12°	4776	**5512**	5882
24°	**4802**	5353	5585
36°	4675	5022	5109
48°	4399	4534	4470
60°	3987	3908	3698
72°	3457	3176	2832
84°	2835	2378	1927
90°	2499	1917	1484

表 C-3（c）　俄亥俄州 Columbus 市的辐照度数据：夏季

（单位：W/m^2）

倾　　角	7月	8月	9月
0°	**5900**	5300	4300
12°	5832	**5431**	4614
24°	5579	5378	**4772**
36°	5140	5138	4764
48°	4531	4720	4593
60°	3779	4143	4265
72°	2922	3434	3794
84°	2013	2630	3202
90°	1561	2206	2869

表 C-3（d） 俄亥俄州 Columbus 市的辐照度数据：秋季和全年平均

（单位：W/m^2）

倾 角	10 月	11 月	12 月	全年平均
0°	3100	1900	1500	3825
12°	3479	2182	1762	4016
24°	3748	2400	1973	**4080**
36°	3895	2546	2125	4013
48°	**3912**	**2613**	2211	3815
60°	3800	2597	**2227**	3496
72°	3563	2500	2172	3071
84°	3211	2326	2049	2563
90°	2997	2212	1964	2287

参考文献

1. Taymur E. Photovoltaics systems sizing [thesis]. Columbus: The Ohio State University; 2009.
2. California Energy Commission. Energy quest. Available at www.energyquest.ca.gov/story. Accessed 2009 June 10.
3. Markvart T, Castaner L. Practical handbook of photovoltaics, fundamentals and applications. Amsterdam: Elsevier; 2003.
4. Ophardt CE. The virtual chembook. Available at http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/320sunenergy.html. Accessed 2009 July 10.
5. Photovoltaic Energy. U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. Available at http://www.nrel.gov/pv/news_hotline. Accessed 2010 Oct 10.
6. Wikipedia. Photovoltaic energy. Available at http://en.wikipedia.org/. Accessed 2009 Oct 9.
7. U.S. Department of Energy. Solar Energies Technologies Program. Available at http://www1.eere.energy.gov/solar/. Accessed 2009 Oct 22.
8. U.S. Department of Energy. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the US Government. Available at http://www.eia.doe.gov/. Accessed 2009 Sept 10.
9. Yogi Goswami JD. Principles of solar engineering. Boca Raton, FL: CRC Press; 2000.

附录 D 风力发电

很多文献对于估计风电功率的基本问题已经有了深入论述[1-4]，这里只做一个简单概述。年可用风能由风速分布确定。威布尔（Weibull）分布可靠性函数被用来描述风速变化[5]。它的表达式为

$$f(v) = \frac{k}{a}\left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot \mathrm{e}^{-\left(\frac{v}{a}\right)^k} \qquad \text{(D-1)}$$

式（D-1）中各变量的定义见表 D-1。

表 D-1　威布尔分布可靠性参数的定义

变　量	定　义
k	时间间隔区间
f	相对概率分布
v	速度
a	尺度参数

多数场址的风速服从瑞利（Rayleigh）分布。式（D-1）中，$k=2$ 时，该分布被称为瑞利分布。因此，瑞利分布仅是尺度参数（a）和风速的函数。某特定风速带在一年中的频率可以从已公布的风速数据获得[6]。

$$f(v) = \frac{t[v \sim v + \Delta v](h)}{\Delta v} \qquad \text{(D-2)}$$

一个时间段的平均风速要通过 $f-v$ 曲线在很长时间积分得到的总面积来计算。因此，要估计平均风速需要把该面积除以该时间段的总小时数[1]。年平均风速近似等于

$$\bar{v} = 0.9a \qquad \text{(D-3)}$$

因此，对于一个站点给定的平均风速，且假定 $a=\bar{v}$，其瑞利分布函数[6]为

$$f(v) = \frac{2v}{\bar{v}^2} \cdot \mathrm{e}^{-(v/\bar{v})^2} \qquad \text{(D-4)}$$

风速 v 通过面积 A 的机械功率约为

$$P = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \qquad \text{(D-5)}$$

式（D-5）中各变量的定义见表 D-2。

表 D-2　估计风力的机械功率的参数定义

变　量	定　义
ρ	空气密度
A	风轮叶片捕捉的风功率
v	速度

因为风轮叶片捕捉风的能量，涡轮使风速从 v_1 降到 v_2。离开风轮叶片的风速如图 D-1 所示，其中 $A_2>A_1$，而 $v_1>v_2$。

风的功率约与风轮叶片的扫掠面积和风速的 3 次方成正比，如式（D-5）所示。

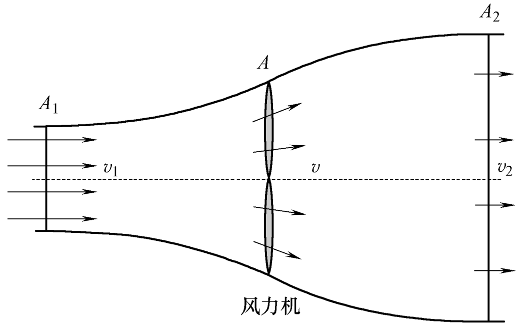


图 D-1　风力机处的风速变化[1]

用 v 表示平均风速，如式（D-6）所示：

$$v=\frac{v_1+v_2}{2} \tag{D-6}$$

通过涡轮后，从风抽取的机械功率 P_T 为[1]

$$P_T=\frac{1}{2}\rho\cdot A\cdot(v_1^2-v_2^2)\cdot(v_1+v_2) \tag{D-7}$$

通过面积 A 的机械功率为

$$P=\frac{1}{2}\rho\cdot A\cdot v^3 \tag{D-8}$$

如所预料，式（D-8）与式（D-5）完全相同。然而在式（D-8）中，速度 3 次方值中使用的是平均速度。

功率系数 c_p 是 P_T 与 P 的比值：

$$c_p=\frac{P_T}{P}\left(1-\frac{v_2^2}{v_1^2}\right)\cdot\left(1+\frac{v_2}{v_1}\right) \tag{D-9}$$

功率系数 c_p 的最大值约为[2]

$$c_{p,max}=0.593$$

这个功率系数最大值称为贝茨（Betz）功率系数。它表明，只有大约 60% 的风功率能被涡轮取得。现代实际的高速风力机的功率系数范围在 0.4 ~ 0.6 之间。叶片更多的低速风力机的该系数值范围为 0.2 ~ 0.4。风电机组的效率指从理想可用功率中获取的功率比值。

$$\eta=\frac{P_T}{c_{p,max}\cdot P}=\frac{c_p\cdot P}{c_{p,max}\cdot P}=\frac{c_p}{c_{p,max}} \tag{D-10}$$

对于功率系数等于 1/2 的风轮，风力机每平方米扫掠面积的最大出力可表示为

$$P_{T,max}(\mathrm{kW/m^2})=\frac{\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}\rho\cdot A\cdot v^3}{A}=\frac{1}{4}\rho\cdot v^3 \tag{D-11}$$

要估算年发电量，需要使用一个表示平均风速 3 次方根（RMC）的新变量：

$$V_{\mathrm{RMC}}(\mathrm{m/s}) = \sqrt[3]{\frac{\int_0^{\infty} f(v) \cdot v^3 \cdot \mathrm{d}v}{365 \times 24}} \tag{D-12}$$

式中，$f(v)$ 是该处风速的频率分布函数。经验证据表明，带相应尺度参数 a 的瑞利函数最适合多数地点的风速频率数据的拟合。年均发电功率可表示为

$$P_{\mathrm{T,max}}(\mathrm{kW/m^2}) = \frac{1}{4}\rho \cdot V_{\mathrm{RMC}}^3 \tag{D-13}$$

年均发电量可表示为

$$E(\mathrm{MW/(m^2 \cdot 年)}) = \frac{1}{4}\rho \cdot V_{\mathrm{RMC}}^3 \times 365 \times 24 \tag{D-14}$$

参 考 文 献

1. Wikipedia. Wind turbines—technical aspects. Available at http://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Wind+Turbines. Accessed 2010 Oct 9.
2. Quaschning V. Understanding renewable energy systems. London: Earthscan: 2006.
3. Patel MK. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006.
4. Abu-ham MS. Modeling of bi-directional converter for wind power generation [dissertation]. Columbus: The Ohio State University; 2009.
5. Fink DG, Beaty HW. Standard handbook of electrical engineering. New York: McGraw-Hill; 2006.
6. Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A, Graber D. Methods of estimating wind speed frequency distribution. Journal of Applied Meteorology 1978, 17(3): 350–353.

Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems/Ali Keyhani© 2011, John Wiley & Sons, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley. All rights reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字 01-2011-5830 号

图书在版编目（CIP）数据

智能电网可再生能源系统设计/（美）凯伊哈尼（Keyhani，A.）著；刘长浥等译. —北京：机械工业出版社，2012.9

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems

ISBN 978-7-111-39544-7

Ⅰ.①智… Ⅱ.①凯…②刘… Ⅲ.①智能控制-电力系统-再生能源-系统设计 Ⅳ.①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 198328 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：闾洪庆

版式设计：霍永明 责任校对：刘怡丹

封面设计：马精明 责任印制：李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 28.5 印张 · 584 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39544-7

定价：118.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**

关于作者

本书作者阿里·凯伊哈尼博士（ALI KEYHANI，PhD）现任美国俄亥俄州立大学电力及计算机工程系教授，是IEEE会员，曾多次获得俄亥俄州立大学工程学院研究奖。他曾为很多电力企业和其他行业做过研究和咨询工作，并在IEEE工程学报上发表过很多论文。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎付承桂

国际视野　科技前沿

国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果　搭建电气工程技术平台

《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
《太阳能物理》
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《磁悬浮轴承 —— 理论、设计及旋转机械应用》
《可再生能源系统——100%可再生能源解决方案的选择与模型》
《机电系统中的传感器与驱动器——设计与应用》
《碳捕获与封存》
《LED照明应用技术》
《零排放动力循环》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《可再生能源的转换、传输和储存》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》
《智能电网中的电力电子技术》
《电接触理论、应用与技术》
《电磁屏蔽原理与应用》
《高效可再生分布式发电系统》
《电网保护》
《分布式发电——感应和永磁发电机》
《电力系统谐波》
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
《高压输配电设备实用手册》
《电力变流器电路》
《电力系统中的电磁兼容》
《超高压交流输电工程》（原书第3版）
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
《电磁兼容原理与应用》（原书第2版）
《电力电子技术手册》
《基于晶闸管的柔性交流输电控制装置》
《电力电容器》
《电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计附习题解答》
《配电可靠性与电能质量》
《现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计》（原书第2版）

WILEY
www.wiley.com

Copies of this book sold without a Wiley Sticker on the cover are unauthorized and illegal

上架指导　工业技术／新能源

ISBN 978-7-111-39544-7

9 787111 395447

ISBN 978-7-111-39544-7　定价：118.00元